

In der Hybridtechnik haben sich zwei Herstellungsverfahren bewährt: Die Dick- und die Dünnschicht-Technik. Der vorliegende Artikel beschreibt Aufbau und Eigenschaften der Dünnschichtschaltungen.

Die Hybridschaltung besteht aus dem Trägersubstrat, auf das Leiterbahnen und Bauelemente aufgebracht werden. In der Dünnschicht-Technik werden Leiterbahnen und ohmsche Widerstände aus je einer aufgesputterten Metallschicht herausgearbeitet, in nachfolgenden Fertigungsschritten werden weitere passive und aktive Bauelemente sowie zusätzliche Verbindungen ergänzt.

Basismaterial

Das Material des Trägersubstrats beeinflusst elektrische, mechanische und thermische Parameter der Gesamtschaltung. Bei Dünnschicht-Schaltungen werden als Basismaterial je nach Verwendungszweck der Schaltung Keramik, polierte Keramik, Glas, Quarz oder für spezielle Anwendungen auch Saphir eingesetzt. Am häufigsten kommt das Keramik-Material 996, bei dem es sich um Aluminiumoxid Al_2O_3 mit einer Reinheit von 99,6 % handelt, zum Einsatz. Handelsüblich sind Substratgrößen von 2 x 2, 3 x 3 und 4 x 4 Zoll² mit einer Dicke von 0,25 und 0,64 mm.

Die Al_2O_3 -Keramik besitzt herausragende Eigenschaften:

Für die relative Dielektrizitätskonstante ist $\epsilon_r=9,6-9,9$ im Vergleich zu ca. $\epsilon_r\approx 4,5$ bei FR4, was Strukturverkleinerungen in HF-Schaltungen erlaubt. ϵ_r ist über weite Bereiche frequenzunabhängig. Die sehr geringen dielektrischen Verluste bis in den Mikrowellenbereich hinein machen Al_2O_3 zum Material der Wahl für die Hochfrequenztechnik. Der Verlustfaktor bei 10GHz beträgt nur $\delta\approx 0.0002$ (99,6% Keramik).

Der spezifische elektrische Widerstand von $>10^{15} \Omega\text{m}$ und eine extrem hohe Durchschlagsfestigkeit von ca. 30kV/mm (von der Dicke abhängig) machen das Material geeignet für Hochspannungsanwendungen und Meßschaltungen die nur geringste Leckströme tolerieren.

Die thermische Leitfähigkeit von ca. $25-40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (Saphir $42\text{W/m}^{-1}\text{K}^{-1}$) erlaubt den Einsatz von Leistungshalbleitern unter hohen Verlustleistungen. Der thermische Ausdehnungskoeffizient von Al_2O_3 -Keramiken/Saphir beträgt dabei $4,5...8,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Al_2O_3 ist äußerst hart, die Oberflächenrauigkeit ist üblicherweise $\leq 0,5\mu\text{m}$. Die Oberflächenrauigkeit ist für den Beschichtungsprozess im Sinne der Haftfähigkeit von entscheidender Bedeutung. Die sehr geringe Porosität der Aluminiumoxid-Keramik bedingt eine geringe Absorption und Adsorption flüssiger und gasförmiger Stoffe was der Langzeitstabilität der gesamten Schaltung zugute kommt und das Ausdampfen bzw. die Desorption von unerwünschten Gasen in einem hermetisch geschlossenen Gehäuse minimiert.

Sputter-Verfahren

Das Sputter-Verfahren ermöglicht Beschichtungen mit Metallen. Es wird in einer glockenförmigen Prozesskammer durchgeführt, wobei das zu beschichtende Substrat in

einigem Abstand über dem sogenannten Target positioniert ist. Das Target bildet das Beschichtungsmaterial. Der Sputter-Prozess findet in einer inerten Gasatmosphäre, meist Argon, unter niedrigem Druck statt. Durch das Anlegen einer Gleichspannung von 1000 bis 5000 V zwischen Anode und Kathode wird eine Glimmentladung zwischen beiden Polen hervorgerufen. Das Substrat ist auf der Anode oder in der Region der Glimmentladung angeordnet, das Target bildet die Kathode. Durch das elektrische Gleichfeld wird das Gas ionisiert und die positiv geladenen Argon-Ionen zur Kathode hin beschleunigt. Die Ionen bombardieren das Kathodenmaterial mit hoher Energie, wodurch Atome aus der Kathode herausgeschlagen werden. Einige der herausgeschlagenen Moleküle oder Atome werden vom Substrat aufgefangen und bilden eine homogene und uniforme Schicht auf dessen Oberfläche. Vorteile dieses Verfahrens gegenüber anderen Methoden sind insbesondere die hohe Haftfähigkeit und elektrische Homogenität der aufgetragenen Schicht.

Beschichtung

Der Aufbau des Schichtsystems auf dem Trägersubstrat erfolgt ganzflächig in mehreren Schritten.

Er beginnt mit dem Aufbringen der Widerstandsschicht, bei der es sich je nach gefordertem Flächenwiderstand um eine CrNi- oder eine Ta₂N-Schicht handelt. Mit einer CrNi-Legierung lassen sich Flächenwiderstände von etwa 80...600 Ω/ realisieren, der Temperaturkoeffizient ist dabei <20 ppm/°C im Temperaturbereich von -50 bis +125 °C. Bei Ta₂N-Schichten sind 30...120Ω/ üblich. Der TK liegt hier bei etwa 1 bis 70 ppm/°C. Die Schicht ist selbstpassivierend und daher, im Gegensatz zu CrNi-Lagen, unempfindlich gegen äußere Einflüsse. CrNi-Schichten werden in der Regel etwa 2 h und Ta₂N-Schichten etwa 20 h bei 300 °C vorgealtert. Die Dicke der Widerstandsschicht ist umgekehrt proportional ihrem Flächenwiderstand und liegt in der Größenordnung von 0,02µm. Aufgabe der Widerstandsschicht ist es auch, für eine gute Adhäsion der folgenden Schichten zu sorgen.

Auf die Widerstandsschicht folgt die Diffusionssperre. Diese Schicht verhindert das Durchdiffundieren von Atomen der darüberliegenden Schichten in die Widerstandsschicht, was z.B. deren Flächenwiderstand verändern würde. Die Diffusionssperre ist nur wenige Ångström dick.

Auf die Diffusionssperre schließt sich eine Goldschicht an, aus der die künftigen Leiterbahnenstrukturen erzeugt werden. Die Goldschicht besitzt eine Dicke von 0,1...0,5µm, wobei eine Dicke von 0,2 µm für Lötverbindungen ausreicht, für zuverlässige Wirebond-Anschlüsse sind 0,5 µm nötig. Falls der Flächenwiderstand es erfordert, kann die Goldschicht selektiv galvanisch auf bis zu 10µm verstärkt werden. Üblich sind etwa 4µm Dicke.

Ein Substrat kann auch beidseitig beschichtet, strukturiert und sogar bestückt werden, wobei die Beschichtung der Rückseite vor allem bei HF-Anwendungen empfehlenswert ist. Durchkontaktierungen sind ebenfalls möglich. Das Mehrlagen-Verfahren ist zwar auch für die Dünnschicht-Technik geeignet, wird aber nur in Ausnahmefällen angewendet.

Leiterbahnen und Widerstände

Die Strukturen der Widerstands- und Leiterbahnen auf dem Substrat erhält man durch einen Ätzprozess. Um eine Leiterbahn zu erhalten, werden alle Schichten entfernt. Wo ein Widerstand entstehen soll, wird nur die über der Widerstandsschicht liegende Goldschicht weggeätzt.

Der Ätzprozess wird fotolithografisch gesteuert, der dazu nötige Fotomaskensatz wird aus den Daten des Layouts gefertigt. Die immer geringer werdenden Linienbreiten in der Dünnschicht-Technik und auch die geometrische Genauigkeit für beispielsweise HF-Strukturen, erfordern teilweise die Verwendung von Chrom-Masken, wie sie auch in der Halbleiterfertigung üblich sind. Der Ätzprozess erlaubt eine geringe Toleranz der Linienbreite und Kantenschärfe. Das ist einer der Gründe, weswegen die Dünnschicht-Technik besonders für HF-Anwendungen einen hohen Stellenwert erreicht hat.

Da alle Widerstände einer Schaltung aus derselben Schicht entstehen, erhält man automatisch geringe Toleranzen ihrer (von der Geometrie unabhängigen) Parameter, insbesondere des Temperatur-Koeffizienten und der Langzeitstabilität. Für benachbarte Widerstände erhält man so einen Gleichlauf besser als 1 ppm/°C über den Temperaturbereich von -55 bis +125 °C. Die Alterung der Widerstände ist geringer als 0,015% bei 125°C über 10000h, was eine hervorragende Langzeitstabilität darstellt.

Widerstandswerte lassen sich durch Laser-Trimmen abgleichen. Der Abgleich kann auch als Funktionsabgleich durchgeführt werden, d.h. die Schaltung kann während des Betriebes gemessen und Widerstandswerte angepasst werden.

Beliebige Widerstandswerte von einigen 10 Ω bis zu einigen 100 k Ω sind hierbei möglich.

Bei höheren Widerstandswerten ist der Einsatz von Dünnschicht-Chipwiderständen zu empfehlen, die ein besonders geringes Eigenrauschen aufweisen. Die Kantenlänge dieser Bauteile beträgt üblicherweise 0,5 bis 1 mm für Werte bis zu 1,5 M Ω .

Bauelemente

Bauelemente wie gehäuste Kondensatoren und Widerstände können mit einem Lot oder mit Silber-Leitkleber an den Kontaktstellen befestigt und leitend verbunden werden. Kapazitäten und Induktivitäten mit kleinen Werten können auch über die Leiterbahngeometrie realisiert werden, dasselbe gilt natürlich ebenfalls für "verteilte" Bauelemente der HF-Technik wie Leitungen, Koppler etc.

Halbleiter-Bauelemente wie Dioden, Transistoren oder ICs werden vorzugsweise als ungehäuste Bauelemente ("Dies" oder "Dice") verarbeitet, was eine erhebliche Miniaturisierung der Schaltung gegenüber dem herkömmlichem Aufbau in Löttechnik – auch in SMT – ermöglicht. Die offenen Bauelemente werden auf Wafer geklebt (Chip-on-Foil) oder in Chip-Trays angeliefert und mit leitendem Epoxy auf dem Substrat befestigt. Die Verbindungen des Dies zu den Leiterbahnen wird dann durch Bonden hergestellt.

Alle gebräuchlichen Halbleitern können auf Hybriden zum Einsatz kommen: Dioden, BJTs, FETs, HF und/oder Leistungshalbleiter, analoge oder digitale ICs von der Spannungsreferenz

bis zum Mikroprozessor. Alle Technologien von GaAs bis SiC können dabei verarbeitet werden.

Bondtechnik

Bei dieser Chip-and-Wire-Technik handelt es sich um ein Mikro-Schweißverfahren, bei dem durch Druck und Wärme ein Kontakt zwischen den Bonddrähten und den Anschlussflächen (Pads) der Chip-Bauelemente bzw. der Goldleiterbahn hergestellt wird. Atomare Bindungskräfte sorgen für eine homogene Verbindung mit verschwindendem Übergangswiderstand und hoher mechanischer Festigkeit.

Dabei unterscheidet je nach der Art der Energiezufuhr und der Verformung der Drahtenden während des Schweißvorgangs zwischen verschiedenen Bond-Verfahren.

So verbindet das Ultraschall-Drahtbonds die Kontaktflächen unter Einwirkung mechanischer Schwingungen und Druck. Die Schmelzpunkte der Materialien werden dabei nicht erreicht. Beim Feindraht-Bonds erfordert der Umgang mit den 10 bis 25µm dünnen Gold- oder Aluminium-Drähten einige Erfahrung, um die zu verbindenden Bauelemente nicht zu beschädigen.

Bei der üblicherweise hohen Zahl von Bondverbindungen pro Schaltung darf die Fehlerquote beim Setzen von Bondverbindungen nur sehr gering sein, um den Yield nicht zu beeinträchtigen. Deshalb werden auch automatische Bonder mit Positionserkennung eingesetzt.

Für höhere Stromstärken werden Dickdrahtbonds mit einem Durchmesser bis zu 500µm eingesetzt, die für einen Dauerstrom von mehreren Ampere geeignet sind.

Mechanischer Schutz

Um die Schaltung vor mechanischer Beschädigung und Umwelteinflüssen zu schützen, muss sie abgedeckt oder in einem Gehäuse untergebracht werden. Dabei dürfen die Schutzmaßnahmen die elektrischen Eigenschaften und das Langzeitverhalten der Schaltung nicht negativ beeinflussen. Den einfachsten Schutz bieten Epoxid- oder Polyurethan-Gießharze sowie Silikone. Tauchumhüllungen und Abdecklacke werden für Konsumer-Produkte in Dickschicht-Technik verwendet.

Jedoch genügt nur ein unter Schutzgas hermetisch verschlossenes Metallgehäuse den höchsten Anforderungen. Als Gas verwendet man dabei Stickstoff mit 5% Heliumanteil. Das Helium ermöglicht die Lecksuche bei der Endprüfung des Hybrids. Zum Verschluss wird je nach Form des Gehäuses das Rollnaht- oder Buckelschweißverfahren angewandt.

Hybridschaltung contra ASIC

Es kann unterschiedliche Gründe geben, eine Hybridschaltung einem ASIC vorzuziehen. Einige davon sind:

- Der Hybrid erlaubt die Verwendung hochwertiger Kapazitäten wie Keramik- oder Folienkondensatoren bis hin zu sehr hohen Werten, aber auch Tantalkondensatoren bis zu mehreren hundert Mikrofarad. Bei vielen Schaltanwendungen oder zur schaltungsinternen Entkopplung sind solche Kondensatoren unverzichtbar. Die Unterbringung von hohen Kapazitäten auf einem ASIC ist nicht möglich. Auch Toleranz und Temperaturkoeffizient diskreter Kondensatoren lassen sich in einer integrierten Schaltung nur schwer oder gar nicht erreichen. Dasselbe gilt natürlich erst recht für Induktivitäten ab einigen nH.
- Dünnschichthybride erlauben die Verwendung von Widerständen sehr geringer Toleranz, was sich auf einem ASIC ebenfalls nur mit hohem Aufwand und Platzbedarf realisieren läßt. Allgemein ist bei einer hohen Anzahl passiver Bauelemente geringer Toleranz der Hybrid der monolithischen Schaltung vorzuziehen.
- Die Kombination von Leistungshalbleitern mit anderen Halbleitern wie etwa Referenzen oder Operationsverstärkern auf einem ASIC kann sehr problematisch sein. In einer Hybridschaltung dagegen läßt sich eine weit bessere elektrische und thermische Entkopplung erzielen. Bei Anwendungen mit hoher Leistung, hohen Stromstärken oder hohen Spannungen kann der hybride Aufbau deshalb Vorteile besitzen.
- Hybridschaltungen bieten problemlos verschiedenen Halbleitertechnologien gleichzeitig Platz, was auf einem ASIC nicht möglich ist.
- Hybride können auch auf einer Vielzahl nicht-elektrischer Wege mit ihrer Umwelt in Verbindung treten: Z.B. über LEDs, Laser, Sensoren oder integrierte Antennen. Für ASICs ist dies meist sehr schwierig oder überhaupt nicht zu realisieren (Gehäuse!).
- Ein Hybrid ist in geringeren Stückzahlen wesentlich preisgünstiger.

Weil man bei einseitiger Beschaltung von 200 Bauteilen pro Quadratzoll ausgehen kann, erlauben die kleinen Strukturen, die sich mit der Dünnschichttechnik realisieren lassen, ebenfalls einen Schaltungsaufbau mit hoher Packungs- und Funktionsdichte. Die daraus resultierenden kurzen Leitungsführungen und Bond-Verbindungen besitzen geringe parasitäre Kapazitäten und Induktivitäten. Die geringen Toleranzen der Strukturen kommen der HF-Technik entgegen.

Investition in Qualität

Die Gründe für die Zuverlässigkeit von Dünnschicht-Hybriden sind vielfältig:

- Die zum Verschluß verwendeten Metallgehäuse bieten hohe EMI-Sicherheit, Schutz empfindlicher Bauteile vor mechanischen und chemischen Einwirkungen (Korrosion) und einen erhöhten Kopierschutz. Der Verschluß der Gehäuse unter wasserfreier Stickstoffatmosphäre ist eine der Voraussetzungen für hohe Lebensdauer und Langzeitstabilität.
- Die verwendeten Montagetechniken erlauben weit höhere Belastung der Schaltung durch Beschleunigungen (z.B. durch Vibration) als bei gelöteten Platinenschaltungen.
- Die hervorragende thermische Leitfähigkeit des Substratmaterials gegenüber z.B. Epoxidharzplatinen verlängert die Lebensdauer der Bauelemente durch niedrigere Temperaturen und Temperaturgradienten. Die Anpassung der verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten der im Aufbau verwendeten Materialien verringert thermische Spannungen und erhöht so die Zuverlässigkeit der Schaltungen erheblich.
- Die integrierten Widerstände und die Leiterbahnen befinden sich im Gegensatz zur Mehrlagen-Technik auf einer Ebene, so daß sich die Schaltung optisch leicht prüfen läßt und eventuell Fehler rechtzeitig erkannt und behoben werden können. Die Mikro-Schweißverbindungen können im Gegensatz zu Lötstellen einzeln durch Pull-Tests auf ihre mechanische Festigkeit geprüft werden, wobei mögliche Schwachstellen, die im späteren Betrieb zu Fehlern führen können, erkannt werden.

Je nach Testvorschrift und Wünschen des Anwenders erfolgt der Test des Hybrids im unverschlossenen Zustand, wobei die visuelle Inspektion gleichzeitig mit dem Prüfen der mechanischen Festigkeit der Bondverbindungen durchgeführt werden kann. Auf diesen Arbeitsschritt folgt das Prüfen der Funktion und eventuell der Funktionsabgleich.

Durch die genannten Tests liegt die im Betrieb auftretende Fehlerrate jenseits von 10^{-5} . Aus der Telekommunikation liegen Erfahrungen vor, wonach von 100000 Hybriden nicht einer wegen defekter Bondverbindungen ausgefallen ist.