

Hochfrequenzboard: Theorie versus Prozesstoleranzen (Teil 2)

Nach der Systembeschreibung und Problemdarstellung im ersten Teil (erschieden in Ausgabe 7/2014) legt der zweite Teil den Schwerpunkt auf die Leiterbahnen, eines der wichtigen Segmente von Systemen.

C. RANZINGER, G. FOTHERINGHAM, C. TSCHOBAN, U. MAASS, I. NDIP, K.D. LANG, K. LÖBBICKE *

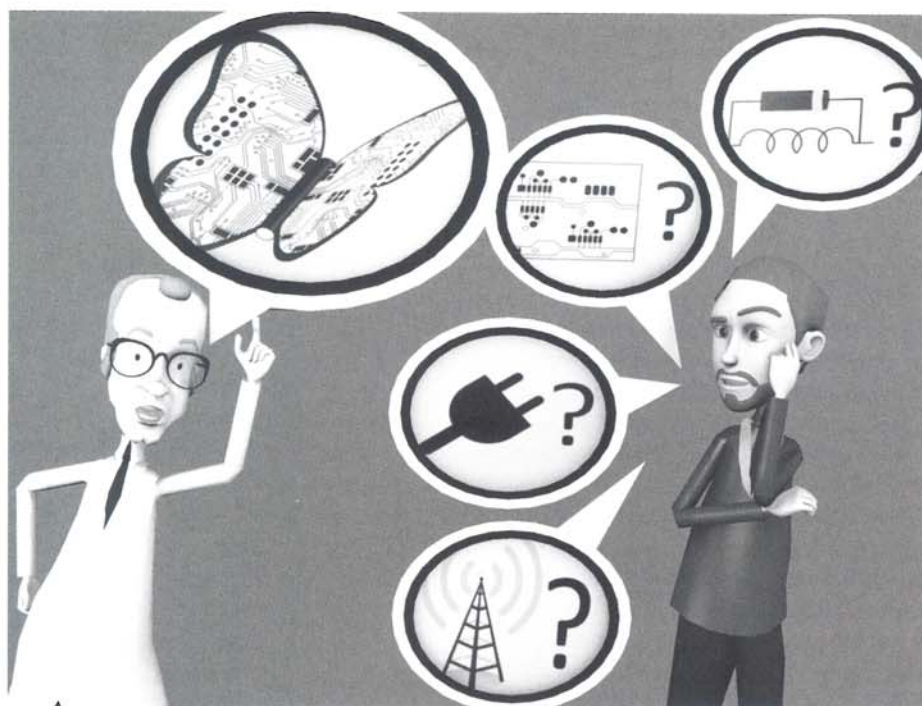


Bild: CONTAG/TU Berlin

Gleichzeitig darf die Kupferoberfläche nicht frei liegen. Zum Standard einer Lötstopplackbeschichtung bietet sich dafür alternativ die vollflächige Beschichtung mit einem Oberflächenfinish an. Weitere relevante Punkte sind die Geometrie der Leiterzüge und die HF-relevanten Materialparameter und Toleranzen. All diese Details sind bei einer Hochfrequenzanalyse mit zu berücksichtigen.

Substrate und ihre Wirkung auf Leitungen

Die Übertragung elektrischer Signale erfolgt durch elektromagnetische Wellen im Substrat zwischen Signal- und Masseleiter (siehe Abbildung 1). Daher kommt der Auswahl des geeigneten Basismaterials (Dielektrikum) beim PCB-Design eine entscheidende Rolle zu. Das bei HF-Designern oftmals zu Unrecht verschmähte Standard-FR4 besitzt im Frequenzbereich bis 1GHz nach wie vor seine Berechtigung und muss nicht zwangsläufig durch teurere Sondermaterialien wie

Vision und Umsetzung: Der Weg zur Realisierung eines Produkts ist mit vielen Detailproblemen gespickt.

Die Anzahl der Nutzer im Internet und die Datenraten steigen rapide an. Neuartige Kommunikationssysteme müssen diesem rasanten Anstieg (Datenraten > 10Gbps) und den dadurch gesteigerten Anforderungen an die Hochfrequenzeigenschaften des Verbindungssystems gerecht werden. Die steigenden Packungsdichten und die zunehmende Miniaturisierung führen außerdem dazu, dass (oft unvermeidbare) Material- und Prozesstoleranzen viel stärker als bisher vom Designer berücksichtigt werden müssen.

All das verlangt neue Ideen für die Herangehensweise beim Systementwurf. Die TU Berlin in Zusammenarbeit mit dem Berliner Fraunhofer-Institut IZM hat sich dieser Herausforderung gestellt. Mit dem M3-Ansatz (Methoden, Modelle, Maßnahmen) wurde eine Herangehensweise entwickelt, die auch

im Höchsthfrequenzbereich eine Partitionierung des elektrischen Verbindungssystems erlaubt. Mit separater Modellierung und Optimierung werden einzelne Bestandteile des sogenannten Signalpfades analysiert und bewertet.

Nach der allgemeinen Systembeschreibung und Problemdarstellung im ersten Teil der Artikelserie legt der zweite Teil nun den Schwerpunkt auf Leiterbahnen, eines der wichtigen Segmente von Systemen. Eine Mikrostreifenleitung ist bereits ein komplexes technologisches System: Durch Hochfrequenzeffekte wie etwa Current Crowding wird die Stromverteilung im Bereich der Mikrostreifenleitung so beeinflusst, dass die Grenzflächen zwischen Metall und Dielektrikum einen größeren Einfluss haben. Dieser Effekt läuft konträr zur Anforderung an eine haffeste und damit raue Kupferoberfläche.

* Christian Ranzinger
... ist Leiter Entwicklung und Technologie beim Berliner Leiterplattenhersteller CONTAG.

* Gerhard Fotheringham
... beschäftigt sich am Berliner Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) mit dem HF-Verhalten von Materialien.

* Christian Tschoban
... ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Technischen Universität Berlin.

* Uwe Maaß
... ist an der Technischen Universität Berlin in den Bereichen HF-Anwendungen und HF-Layouts tätig.

* Ivan Ndip
... ist Gruppenleiter am Fraunhofer IZM in Berlin.

* Klaus-Dieter Lang
... ist Institutsleiter des Fraunhofer IZM in Berlin.

* Kai Löbbicke
... arbeitet bei Rohde & Schwarz in München und entwickelt neue Verfahren in der Leiterplattenfertigung für HF-Applikationen.

PTFE ersetzt werden. Hier gilt es, neben den benötigten HF-relevanten Eigenschaften auch andere Faktoren zu berücksichtigen. Ein ideales Basismaterial verfügt über diese Eigenschaften:

- In weitem Frequenz- und Temperaturbereich bekannte Dielektrizitätskonstante D_k ,
- Möglich konstant über Frequenz,
- Niedriger Verlustfaktor $\tan\delta$,
- Hohe thermische Performance (ausreichend hohe Glasübergangstemperatur T_g , thermische Beständigkeit, Zersetzungstemperatur und Dimensionsstabilität CTEz),
- Geringe Feuchtigkeitsaufnahme,
- CAF-Beständigkeit,
- Problemlos und mit Standard-FR4-Parameter kompatibel prozessierbar (mechanische Bearbeitung, Metallisierung der Hülsen, UV-Blocker- und AOI-kompatibel),
- Geringe Kosten.

In der Realität müssen für High-Performance-Materialien insbesondere bei den letzten beiden Punkten deutliche Abstriche gemacht werden. PTFE-basierte Materialien sind reaktionsträge und kaum zu benetzen; die Abscheidungsprozesse in den Hülsen bedürfen einer speziellen und aggressiven Plasmavorbehandlung. Auch das mechanische Bearbeiten dieser Materialien ist nicht unkritisch, da sie aufgrund der thermoplastischen Materialeigenschaften stark zum Schmelzen neigen. Darüber hinaus ist die Haftung der Kupferfolien deutlich geringer.

Das Basismaterial ist ein Verbundstoff, der sich grundsätzlich aus einem Harzsystem und Komponenten wie Füllstoffen und/oder Glasgeweben zusammensetzt. Jene Ergänzungen sind notwendig, um die benötigte

Grafik: CONTAG/TU Berlin

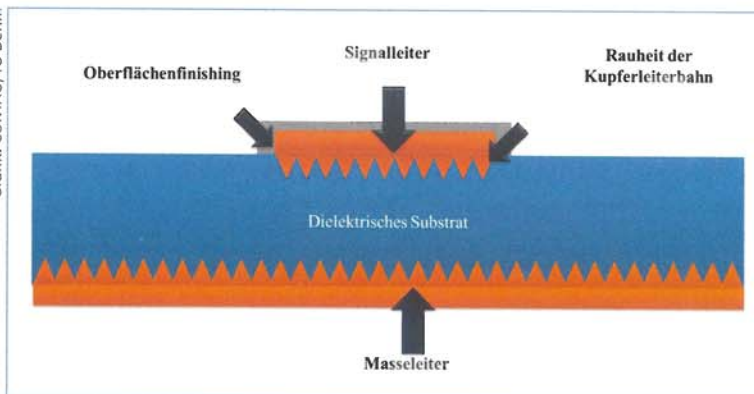


Abbildung 1:
Schematische Darstellung einer Mikrostreifenleitung

mechanische und thermische Stabilität zu erreichen. Dies wirkt sich jedoch oftmals nachteilig auf die elektrischen Eigenschaften aus: Glasgewebe-gestützte Epoxydharz-Materialien (der Standard in der Leiterplattenfertigung) besitzen keinen homogenen Aufbau. Auf der Board-Oberfläche gibt es Schwankungen der dielektrischen Eigenschaften. Da Glas eine höhere Permittivität als die verwendeten Organika besitzt, „spürt“ eine sensible Leitung ihre Positionierung gegenüber den Glasfasern. Technische Antworten des Materialherstellers wie spezielles E-Glas und gespreizte Gewebe werden immer mit erhöhten Kosten erkaufte.

Für den Bereich zwischen 1 GHz und 30 GHz gibt es Alternativsysteme aus modifiziertem FR4 sowie Materialien aus Hydrocarbon-Harzsystemen, die in den Verarbeitungseigenschaften näher an den konventionellen Epoxydharz-Materialien sind. Neben den Spezialanbietern Rogers, Arlon, Neltec und Taconic haben mittlerweile auch die etablier-

ten PCB-Standardmateriallieferanten wie Panasonic und Isola eine Vielzahl an HF-gerechten Basismaterialien im Angebot. Hier steht erneut der Leiterplattenhersteller in der Pflicht, gerade unter Kostenaspekten geeignete Alternativen vorzuschlagen.

Grundsätzlich kann man die verfügbaren HF-Substrate in folgende vier Hauptgruppen unterteilen (siehe Tabelle 1):

- Standard-FR4
- Modifiziertes FR4
- Hydrocarbon
- PTFE

Für das Design spielen die dielektrischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Frequenz eine zentrale Rolle. Datenblätter geben meist nur einen Wert bei einer relativ niedrigen Frequenz an. Das Fraunhofer IZM hat daher einen Messplatz zur dielektrischen Materialcharakterisierung von einigen MHz bis in den Bereich über 100 GHz aufgebaut.

Während bei dem Verlustfaktor eine Abschätzung nach oben ausreicht, ist bei der

VADU 200 XL-W



PINK entwickelt und produziert nach Kundenanforderung auch substratspezifische Werkstückträger für Wafer.

PiNK[®]

Lunkerfreies Vakuumlöten von Wafern im Batchbetrieb

Systemeigenschaften

- Getrennte Prozesskammern für das Löten und Kühlen
- Löten mit Preforms und/oder Pasten
- Individuelle Lötprofile
- Löttemperaturen bis 400 °C
- Separate Löt- und Kühlkammer
- Ameisensäureprozess
- Kondensatabscheidung
- Reproduzierbarkeit der Lötresultate

smthybridpackaging

Internationale Fachmesse und Kongress für Systemintegration in der Mikroelektronik
Nürnberg, 06. – 08.05.2014



Wir stellen aus: Halle 9, Stand 204

Dielektrizitätskonstante Dk die Kenntnis des genauen Wertes zur Gewährleistung eines konstanten Wellenwiderstandes unerlässlich. Gerade im Hochfrequenzbereich ist dies zur Vermeidung von Reflexionen entscheidend. Neben den Toleranzen von Dk und $\tan\delta$ und deren fehlender Gleichmäßigkeit auf der Oberfläche bei Glasgewebe-gestützten Materialien zeigen die Dickentoleranzen den größten Einfluss auf die elektrische Performance von Mikrostreifenleitungen.

Die Rauheit und ihre Wirkung auf die HF-Performance

Im Kontext mit HF-relevanten Eigenschaften einer Schaltung wird immer wieder die Minimierung der Rauheit der Leiterzüge gefordert. Zugleich bringt uns nur eine differenzierte technische Betrachtung weiter: Welche Prozesse bestimmen überhaupt die Flanken- und Bodenrauheit? Welche Rauheit kann der PCB-Hersteller beeinflussen und welche Rauheit ist bei welchem Design und welchem Oberflächenfinish relevant?

Im Fertigungszyklus von Leiterplatten und Packages erfolgen diverse Laminier- und Pressprozesse. Dazu gehören das Aufbringen von Resisten für die fotolithografische Strukturierung, das Beschichten mit Lötstopplacken und das Zusammenfügen von vorstrukturierten Innenlagen zu einem Multilayer-Verbund. Bei allen Prozessen sind hohe Haftfestigkeiten gefordert, die primär durch eine Vergrößerung der aktiven Oberfläche (Aufrauen) sichergestellt werden. Dazu werden nass-chemische Mikroätzprozesse oder mechanische Verfahren angewandt.

Marktübliche chemische Mikroätzverfahren weisen, abhängig von der Ätzrate mit $R_a = 0,2 - 0,5\mu\text{m}$ und $R_z = 2,5 - 5\mu\text{m}$, vergleichbare Oberflächentopografien auf. In der Marktentwicklung und Einführung befinden sich Prozesse für chemische Haftvermittlerschichten (Primer), die die Flankenrauheit extrem minimieren können.

Die Bodenrauigkeit führt dazu, dass bei Frequenzen $> 1\text{ GHz}$ die Ohmschen Verluste der Leitungen deutlich steigen. Die Wellen

	DK	TANA	KOSTENFAKTOR
Standard-FR4	3,8 – 5	0,01-0,02	1
Modifiziertes FR4	3,3 – 3,8	0,005-0,01	2
Hydrocarbon	3 – 6*)	0,002 – 0,005	5-10
PTFE	3 – 12*)	0,001-0,0025	10-50

*) Über konkreten Materialtyp auswählbar, dann aber konstante und reproduzierbare Werte

Tabelle 1: Die verfügbaren HF-Substrate lassen sich in vier Hauptgruppen unterteilen.

	INNENLAGE	AUSSENLAGE
Bodenrauheit	<ul style="list-style-type: none"> • Durch Treatment der Materialhersteller definiert, siehe Datenblätter • Teilweise Alternativen (z.B. Low Profile Cu-Folien) 	
Flankenrauheit	<ul style="list-style-type: none"> • Durch Treatmentprozess beim PCB-Hersteller bestimmt • Alternativen: Primer Coatings 	<ul style="list-style-type: none"> • Durch Mikroätz- oder mechanische Verfahren beim PCB-Hersteller bestimmt • Alternativen: Primer Coatings

Tabelle 2: Bodenrauheit versus Flankenrauheit – diese Eigenschaften lassen sich nur zum Teil vom PCB-Hersteller beeinflussen.

dringen bei diesen Frequenzen nur wenig in die Leiterbahnen ein (Skinneffekt). Die Rauheit verlängert die Wege, die der Strom nehmen muss. Somit steigen auch die Ohmschen Verluste. Daher bieten immer mehr Kupferfolienhersteller Low-Profile-Folien an, bei denen die Bodenrauheit zum Substrat von $R_z = 7 - 10\mu\text{m}$ auf $R_z < 5\mu\text{m}$ verringert ist.

Die Wirkung des Oberflächenfinish auf die HF-Performance

Ähnlich wie bei den Basismaterialien gibt es auch bei den Oberflächenfinishes Anforderungen, die nicht immer optimal miteinander vereinbar sind:

- Ideale elektrische Eigenschaften (hohe Leitfähigkeit, geringe Leitungsverluste),
- Universell bondfähig (Aluminium- und Golddrahtbonden),
- Mehrfach lötfähig,
- Planarität der Anschlussflächen,
- Lange Lagerfähigkeit,
- Umweltgerecht,
- Geringe Kosten.

Bei den vielen Varianten am Markt zeigt sich schnell, dass es keine universelle Lösung für alle Anforderungen gibt. Die preislich attraktivsten Varianten im einfachen bis mittleren Technologiebereich sind nach wie vor HAL (Hot Air Leveling), chemisch Zinn und OSP (Organic Surface Passivation). Bei Fine Pitch-Applikationen mit Bondoberflächen dominieren die teureren Prozesse ENIG (Electroless Nickel + Immersion Gold; Aludraht-bondbar) bzw. ENEPIG (Electroless Nickel + Electroless Palladium + Immersion Gold; universell bondbar). Dabei ist die phosphorhaltige Nickelschicht dieser Varianten problematisch. Der Grund liegt am hohen Ohmschen Widerstand im Vergleich zu anderen Oberflächenveredelungen.

Derzeit stehen drei weitere alternative Oberflächenfinishes im Fokus der HF-Entwickler: chemisch Silber (Aludraht-bondbar), ASIG (Autocatalytic Silver + Immersion Gold; universell bondbar) und EP (Electroless Palladium; universell bondbar).

Generell gilt, dass das Oberflächenfinish nur dort Einfluss nimmt, wo sich kein Lötstopplack befindet: die Leiterbahnen unter dem Lötstopplack bestehen aus reinem Kupfer. Alternativ verzichtet man auf den Lötstopplack und beschichtet vollflächig.

In Teil 3 der Artikelreihe erwarten Sie weitere Untersuchungsergebnisse zu HF-relevanten Fertigungseinflüssen, Toleranzen in den Leiterzügen und die Charakterisierung von Durchkontaktierungen. // FG

Hochfrequenz-Tag in Berlin

Am 13. Mai 2014 findet beim Leiterplattenhersteller CONTAG in Berlin ein Hochfrequenz-Tag statt. Neben interessanten Fachvorträgen besteht dort die Möglichkeit, mit Wissenschaftlern und Mitarbeitern des Fraunhofer IZM, der TU Berlin, von Polar Instruments, von

CONTAG sowie mit zahlreichen Schaltungsentwicklern und Branchenexperten Erfahrungen und Probleme rund um die Themen HF-Design und Leiterplattenfertigung zu diskutieren. Details und Anmeldehinweise finden Sie im Internet unter www.conday.de.

CONTAG
+49(0)30 3517880