

Der Entwurf von Backplanes und Steckkarten für Systeme mit langen seriellen Verbindungen und steigenden Datenraten wird immer schwieriger. Unter Einhaltung der gesteckten Kosten- und Zuverlässigkeitsvorgaben muss der Designer die von diesen höheren Bandbreiten geforderte Signalintegrität erreichen.

Sobald die Datenraten von 2,5 Gbit/s auf 3,0 Gbit/s angehoben werden, treten die Verluste infolge des Skin-Effekts gegenüber den Verlusten im Dielektrikum in den Hintergrund. Das Verbreitern der Leiterbahnen bringt dann kaum noch Verbesserungen. Steigern lässt sich die Leistungsfähigkeit dagegen durch Senkung der dielektrischen Verluste im Leiterplattenmaterial. Verlustärmere Werkstoffe führen zu niedrigeren Dielektrizitätskonstanten, die wiederum dünnere Leiterplatten möglich machen. Besonders wichtig wird dies durch die zunehmende Verdrahtungsdichte und den Trend zu immer mehr Leiterplattenlagen.

Die Anbieter von Halbleiterbauelementen reagieren auf das Bandbreitenproblem, indem sie bei den I/O-Funktionen ihrer Chips auf digitale Signalverarbeitung (DSP) setzen. Viele Bauelemente sind bereits mit Vorverzerrung, adaptiver oder passiver Entzerrung ausgestattet, und für künftige Produkte werden noch exotischere DSP-Technologien in Aussicht gestellt. Ab einem bestimmten Punkt jedoch verursacht die Verwendung spezieller Laminatwerkstoffe für hohe Signalfrequenzen weniger Kosten als die Zusatzmaßnahmen, die nötig sind, um konventionelles FR4 für 10 Gbit/s tauglich zu machen. Kombiniert man die erwähnten DSP-Techniken gar mit Hochleistungs-Laminaten, wird der Weg frei für kosteneffektive Kupfer-Verbindungs-lösungen für 10 Gbit/s und mehr.

Lamine auf PTFE-Basis bieten Vorteile

PTFE (Polytetrafluorethylen) wird schon seit langem in HF-Anwendungen bis 77 GHz verwendet. Der hohe Preis der PTFE-Lamine war bei den kleinen, aus nur wenigen Lagen bestehenden HF-Leiterplatten der Vergangenheit allgemein hinnehmbar. Inzwischen wird PTFE jedoch vermehrt in digitalen Hochfrequenz-Anwendungen eingesetzt, die wesentlich mehr Lagen, kleinere und einheitlicher durchkontaktierte Vias sowie höhere Signaldichten erfordern.

Auf dem Markt sind heute mehrere Hochleistungs-Werkstoffe erhältlich, zum

Mehr Speed mit PTFE

Leiterplatten-Werkstoffe auf PTFE-Basis ermöglichen höhere Datenraten

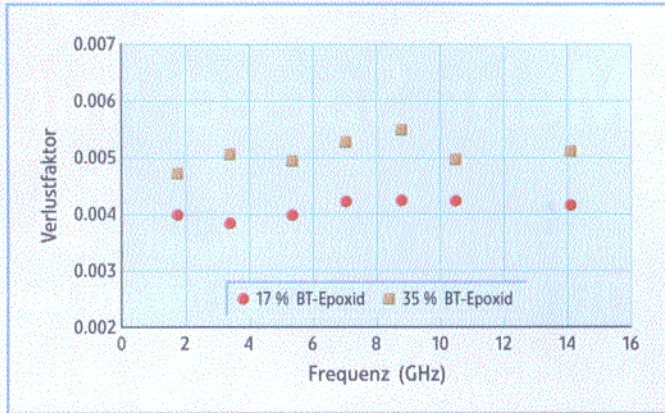
*Meagan Morrell, Robert Cutler, Nashua / USA;
Thomas F. McCarthy, Petersburg / USA*

Bei Hochfrequenzanwendungen bis 77 GHz hat sich PTFE bereits vielfach bewährt. Messungen zur Signalintegrität bestätigen nun, dass PTFE auch für größere Leiterplatten zur Übertragung hoher Datenraten bis zu 10 Gbit/s mit geringen Leistungsverlusten geeignet ist. Zudem kann sich trotz höherer Materialkosten das Gesamtsystem rechnen.

Beispiel Getek, Nelco 4000-13, Nelco 4000-13 SI und Rogers 4350. Die wachsende Nachfrage nach verlustarmen Boards hat die Hersteller Isola, einen der größten FR4-Lieferanten der Welt, und Taconic, einen Anbieter PTFE-basierter Lamine für die HF- und Mikrowellen-Industrie, zur Entwicklung eines Leiterplatten-Werkstoffs mit den Performance-Vorzügen von PTFE

veranlasst. Das PTFE-Material wird mit einem speziellen Klebemittel versehen, um es mit einem BT-Epoxid zu verbinden und ein praktisch nutzbares Laminat herzustellen. Diese Werkstoffkombination hat eine Reihe von Vorteilen. Die elektrische Leistungsfähigkeit von PTFE wurde mit Hilfe von Signalintegritäts-Messungen ausreichend dokumentiert.

Bild 1.
PTFE-Laminat weist einen sehr geringen dielektrischen Verlustfaktor auf



Notwendige Kompromisse bei Hochleistungs-Werkstoffen

Um das optimale Material für eine bestimmte Anwendung zu finden, muss der Designer eine Vielzahl von Eigenschaften berücksichtigen. An erster Stelle steht der dielektrische Verlustfaktor, der bei PTFE abhängig von der verwendeten Klebmittelmenge zwischen 0,004 und 0,005 liegt und kaum frequenzabhängig ist, was bei der Begrenzung hochfrequenter Oberschwingungen hilft (Bild 1). Die deutlich höheren dielektrischen Verlustfaktoren von Nelco 4000-13 (0,014) und 4000-13 SI (0,009) müssen oberhalb von 10 Gbit/s berücksichtigt werden.

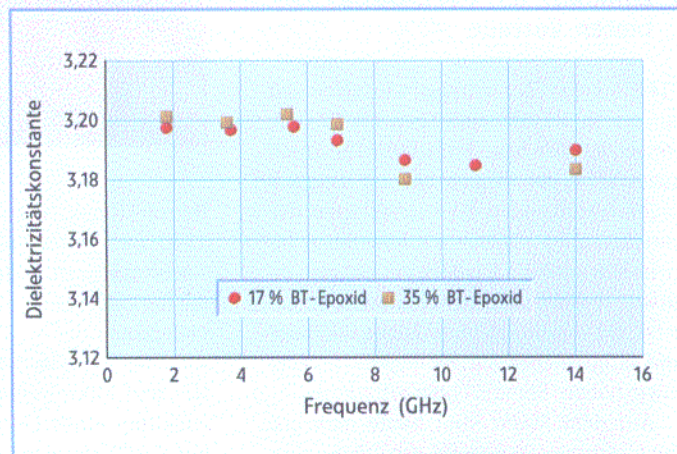
Die Dielektrizitätskonstante von PTFE ist verglichen mit zahlreichen anderen Hochleistungs-Werkstoffen relativ gering und liegt über einen sehr weiten Frequenzbereich bei oder unter 3,2 (Bild 2). Das erleichtert es, die Gesamtstärke der Leiterplatte zu verringern, und wegen der dünneren Einzellagen wird der Abstand der Signal-Leiterbahnen zu den Masseflächen kleiner. Da hieraus ein geringeres Übersprechen resultiert, kann die Leiterbahndichte erhöht und die Anzahl der Leiterplattenlagen (und damit die Dicke des Boards) verringert werden. Es ist offensichtlich, dass sich dies sehr günstig auf die Stückkosten auswirkt.

Ungeachtet dieser Unterschiede bei der Herstellung ist zu beachten, dass die meisten anderen Hochleistungs-Werkstoffe spezielle Verarbeitungsverfahren erfordern. Bei Hybrid-Werkstoffen auf PTFE-Basis entfallen beispielsweise einige der Probleme, die bei anderen exotischen Materialien auftreten. Zu nennen sind unzureichende Hit-Counts beim Bohren sowie verringerte Haftung der Kupferkaschierung und der Lötstoppsmasken. All dies kann die Produktionsausbeute ernsthaft

beeinträchtigen. PTFE-basierte Laminat lassen sich allerdings nicht wie FR4 verarbeiten, denn PTFE erfordert vor der Metallisierung eine Plasmabehandlung. Bei den meisten Herstellern ist die entsprechende Ausrüstung jedoch ohnehin vorhanden, da sie für die Verarbeitung anderer Materialien benötigt wird. Auch das Desmearing (Entfernung von Harzverschmierungen im Bohrloch) erweist sich bei PTFE als schwieriger. Die Bohrungen müssen sehr sauber ausgeführt werden, um ohne größeres Plasma-Desmearing auszukommen. Häufiges Wechseln der Bohreinsätze ergibt Bohrlöcher mit glatter Oberfläche.

Auch der Wärmeausdehnungskoeffizient ist bei PTFE höher als bei vielen wärmeaushärtenden Harzen. Er kann in Z-Richtung zwischen 70 und 300 ppm/°C liegen. Viele Ingenieure sind der Ansicht, dass ein höherer Wärmeausdehnungskoeffizient entlang der Z-Achse die Zuverlässigkeit beeinträchtigt. Da PTFE ein Weichpolymer ist, nimmt sein Elastizitätsmodul mit steigender Temperatur steil ab. Die Spannung wird von Ausdehnung und Elastizitätsmodul bestimmt, sodass beide Faktoren berücksichtigt werden müssen.

Bild 2.
Die Dielektrizitätskonstante beträgt über einen weiten Frequenzbereich maximal 3,2



Die resultierende Ausdehnung des Epoxids dürfte in der Praxis eine größere Belastung für eine durchkontaktierte Bohrung darstellen als das PTFE, da sein Elastizitätsmodul bis zu seiner Glasumwandlungs-Temperatur konstant bleibt. Die thermische Zuverlässigkeit von PTFE-basierten Multilayern mit 20 Lagen und 0,120- bis 0,180-Zoll-Bohrungen (0,3 bis 0,5 cm) im Durchmesser von 0,020 Zoll (0,1 cm) haben gezeigt, dass die Werkstoffkombination bezüglich des IST-Tests, der Liquid-to-Liquid-Temperaturschocks, der Delaminierungszeit und der sechsfachen Lot-Benetzung sehr robust ist.

Kosten sind häufig subjektiv und hängen zu einem großen Teil von den Prozessen ab, die der einzelne Hersteller beherrscht und bevorzugt. Vorläufige Daten deuten allerdings darauf hin, dass das Laminat selbst etwa viermal teurer ist als FR4. Je nach Stückzahl ergibt sich daraus für die fertige Leiterplatte eine Verteuerung um den Faktor 1,6 bis 1,9. Mit zunehmender Verbreitung PTFE-basierter Laminat werden die Kosten jedoch weiter sinken.

Testobjekt für PTFE

Um Aussagen über die Leistungsfähigkeit einer typischen PTFE-basierten Backplane einzuholen, wurde von Teradyne Connection Systems ein 20-lagiges Testobjekt speziell für SI-Messungen entworfen und hergestellt. Das Board besteht aus Single-Striplines und abwechselnden Power- und Ground-Planes. Es ist 18 x 24 Zoll (45,7 x 61 cm) groß und beinhaltet jeweils 8 mil starke Kernlagen aus einem PTFE/Glasgewebe-Verbundstoff oder einer Struktur aus PTFE, Glasgewebe und Klebmittel, verbunden durch drei Schichten aus PTFE/Glasgewebe/Klebmittel-Prepreg. Die differenzielle 100-Ω-Leiterbahngeometrie

weist 8 mil Breite und 8 mil Abstand sowie eine Edge-Coupled-Konfiguration auf. Es wurden serielle Verbindungen mit 10 Zoll (25,4 cm) und 20 Zoll (50,8 cm) Länge implementiert.

Für die Signalintegritäts-Messungen werden mittels zweier Teradyne-GbX-Steckverbinder zwei FR4-Steckkarten an die Backplane angeschlossen. Auf der Basis herkömmlicher Presssitz-Technik bieten diese leistungsfähigen differentiellen Steckverbinder eine sehr hohe Kontaktdichte. Konfigurationen mit drei, vier oder fünf Kontaktpaaren ergeben 16, 21 und 27 differenzielle Paare pro Zentimeter Länge.

KONTAKT

Teradyne GmbH,
81673 München,
Tel. 0 89 / 4 18 61 -1 09,
Fax 0 89 / 4 18 61 -2 83,
www.teradyne.com

Taconic Advanced Dielectric Division,
Mullingar, Irland,
Tel. +3 53 / 44 40 47 7,
Fax +3 53 / 44 44 36 9,
www.taconic-add.com

In modernen Backplanes wird vom Steckverbinder Flexibilität hinsichtlich der Signaldichte gefordert, ohne dass Abstriche am Signal-Routing nötig sind. Die Gesamt-Bandbreite ist das Produkt aus Kontaktdichte und serieller Datenrate. Auch einfaches Routing ist wichtig, denn es sorgt für mehr Flexibilität und verringert den Zeitaufwand für das Leiterplatten-Layout. Um die Leiterplattenstärke zu minimieren, sollten für das Routing des Steckverbinders möglichst wenig Leiterplattenlagen nötig sein. Da der GbX-Steck-

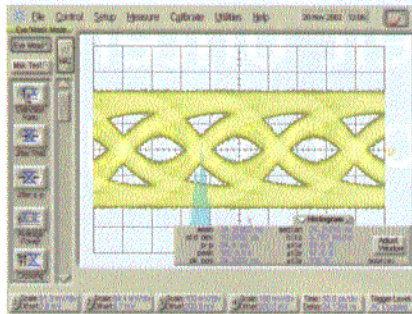


Bild 3. Augendiagramm bei 7,5 Gbit/s und 10 Zoll (25,4 cm) Leiterbahnlänge

verbinder vertikales und horizontales Routing durch die Kontaktreihen erlaubt, sorgt er für Flexibilität und kommt potenziell mit weniger Signallagen aus.

Sämtliche Messungen wurden mit einer differentiellen Spannung von 200 VPP und einem 2²³-1-PRBS-Muster durchgeführt. Bei 7,5 Gbit/s über eine 10 Zoll (25,4 cm) lange Leiterbahn weist das Augendiagramm eine Weite von 216 mV und einen Jitter von 54,4 ps auf (Bild 3). Bei höheren Datenraten und längeren Leiterbahnen schließt sich das Augendiagramm. Die Verluste hängen indes nicht nur von der Backplane, sondern vom kompletten System ab, und die FR4-Steckkarten tragen in erheblichem Maß zu den Verlusten bei. Um exaktere Aussagen über die PTFE-Backplane zu erhalten, war deshalb ein neues Testobjekt ohne Steckkarten erforderlich.

Geringere Verluste mit Hybrid-Material

Im neuen Testobjekt wurden PTFE-Lamine für die Rückseite eingesetzt. Das sechslagige Hybrid-Board besaß eine 50-Ω-Stripline-Konfiguration mit 1-oz-Kupferbeschichtung. Das Board besitzt einen 10 mil starken Kern aus PTFE/Glasgewebe/Kle-

bemittel und zwei Bonding-Schichten aus PTFE/Glasgewebe/Klebmittel in Kombination mit vier FR4-Lagen. Mit einem Netzwerk-Analysator wurde der Signalverlust (S21) im Frequenzbereich als Funktion von Leiterbahnlänge (10 bis 30 Zoll, 25,4 bis 76,2 cm), Frequenz und Material gemessen. (Dieses Stripline-Testobjekt besaß keine Steckkarten und Steckverbinder. Die Daten gelten für Backplanes und Steckkarten, doch wurde das Testobjekt selbst als einfache sechslagige Stripline-Struktur hergestellt, um das Material mit minimalen Unstetigkeiten testen zu können.)

Die PTFE-basierten Verbundstoffe ergaben 4 dB Verlust bei 10 Zoll (25,4 cm) Leiterbahnlänge, 7 dB bei 20 Zoll (50,8 cm) und 11 dB bei 30 Zoll (76,2 cm), während es bei FR4-Lösungen 8, 16 und 24 dB sind (Bild 4).

Fazit

Ständig zunehmende Datenraten und immer höhere Bestückungsdichten veranlassen die Designer, die Vorteile leistungsfähiger Werkstoffe abzuwägen. Wie in jedem kritischen System müssen dabei Attribute wie Leistungsfähigkeit, Kosten und Zuverlässigkeit beachtet werden. Das Testobjekt von Teradyne hat bewiesen, dass sich Leiterplatten auf PTFE-Basis für Datenraten über 10 Gbit/s eignen, wenn das System sorgfältig durchentwickelt wird. Aus den Daten lässt sich ferner entnehmen, dass PTFE-basierte Lamine kombiniert mit moderner DSP-Technologie die Einsatzmöglichkeiten kupferbasierter Backplanes und Verbindungsstrukturen noch entscheidend ausweiten können.

Literatur

- 1 M. Morrell, T. McCarthy: »Signal-Integrity Measurements Support the Candidacy of PTFE at High Data Rates«; DesignCon-2003-Präsentation, 27.-30. Januar 2003, Santa Clara, Kalifornien/USA

Autoren

Meagan Morrell ist Signal-Integrity-Ingenieurin in der »New Products Development Group« bei der Connection Systems Division (www.teradyne.com/tcs) von Teradyne in Nashua, New Hampshire/USA. Robert Cutler ist Signal-Integrity-Ingenieur bei Teradyne in Nashua. Thomas F. McCarthy ist bei Taconic in der Advanced Dielectric Division in Petersburg, New York/USA, Produktmanager für den Bond-Film »TacPreg« und technischer Manager für Taconics Tätigkeiten in den USA.

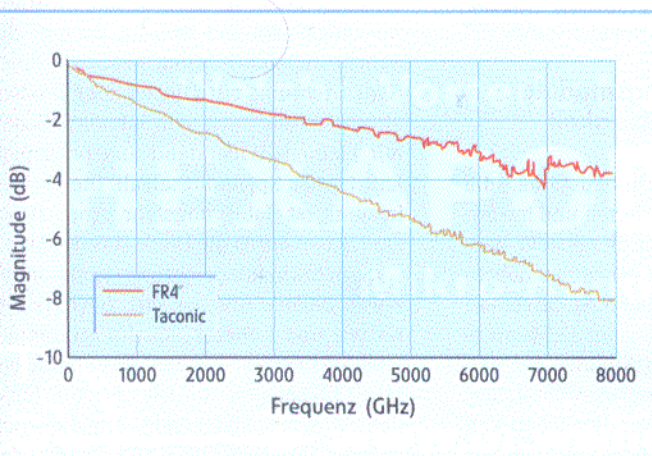


Bild 4. S21-Verlustmessung an PTFE-Verbundwerkstoff auf FR4-Basis bei 10 Zoll (25,4 cm) Leiterbahnlänge