ベンゾシクロブテン（BCB） 薄膜多層配線基板

Multilayer Interconnect Board Based on Polymer Dielectric
from Benzocyclobutene Resin

高橋 忠*

はじめに

近年、エレクトロニクスの急速な発展に伴い電子機器の小型化、高密度化、高機能化が表面実装技術等の高密度実装技術によってますます加速されている。一方、それに対応して有機高分子材料の開発とデバイスへの応用技術の開発はめざましいものがある。

本稿では次世代の高密度多層配線技術（HDMI）として注目されているマルチチップモジュール（MCM）¹⁾とMCM用絶縁膜材料として有望視されているベンゾシクロブテン（BCB）樹脂について、諸特性、使用法および使用例について述べる。

1. マルチチップモジュール（MCM）

新しい高密度多層配線技術（HDMI）を使ったMCMは従来のハイブリッド製造技術とは異なる技術とされている。その最も大きな相違点はそのモジュールを製造する材料であり、また、そのモジュールの使用目的である。ハイブリッド技術はMSIあるいはLSI技術を置き換える技術であるのに対して、MCMは歩留りや重複をなくしたWSIの実践的なアプローチである。

MCM技術では基板上に薄膜の絶縁層や金属導体層を交互に形成、パターンニングを繰り返して多層配線構造を製造し、その上に複数のベアチップを実装する。

MCMを採用することにより、次のような利点があげられる²⁾。

- A. 超高密度実装
- B. システムの高性能化
- C. システムの小型化・軽量化
- D. 消費電力の低減
- E. 信頼性の向上

これらの利点はおもに導体の線幅、配線長の短縮化、部品点数や半田付け箇所³⁾の減少によって達成される。

MCMの配線間絶縁材料の特性は、システムのパフォーマンスだけでなく製造プロセス上および信頼性に大きく影響を与える。MCM絶縁層に要求される物性としては次のようなものがある。

- ①低誘電率
- ②低吸湿率
- ③高耐熱性
- ④高平坦化性
- ⑤高接着性
- ⑥高耐薬品性

などである。

絶縁層にはセラミックや有機材料が使われるが、誘電率が小さいことや高密度化しやすいという理由で次第に有機材料が使われるようになってきている。有機材料には普通ポリイミドが使われている^{3)~5)}。しかし、ポリイミドは一般的に吸水性が高いことなどいくつかの問題があり、製造工程上あるいは信頼性の障害となっている。

最近、米国ダウ・ケミカル社がまったく新しいアプローチで開発した熱可塑性樹脂、ベンゾシクロブテン（BCB）がにわかに注目を浴び有望視されるようになってきている^{6),7)}。BCBはポリイミドに替わり、上記の要求特性を満たす有機材料として、またMCM等絶縁材料として優れた物性をもっている。

*Tadashi Takahashi

ダウ・ケミカル日本／DOW Chemical Japan Limited

Vol.7, No.1

2. BCB樹脂の構造および硬化

BCBの重合の基本となる反応性分子は、Fig.1に示すモノマーの熱開環反応によって生成する反応中間体O-キノジメタンである^{8),9)}。この中間体は、他のモノマーや別のO-キノジメタンと反応を繰り返しながら重合硬化する。二官能ビスベンゾシクロブテンは2つのBCB基の間にRグループが挿入されたモノマーである¹⁰⁾。

Fig.2にジビニルシロキサンで結合されたベンゾシクロブテンの構造を示した。BCBのモノマーからO-キノジメタンを経て重合硬化する変化は、ディールスアルダー反応と呼ばれる反応を基本とした重合および架橋反応であるため、完全な熱のみによる反応であり、触媒・開始剤はいっさい必要としない。また、硬化時に縮合水のような揮発性物質の発生もないという特徴も持っている。BCBの硬化は酸素濃度300ppm以下に管理した窒素雰囲気中で、250℃、1時間程度の加熱で行われ安定な絶縁膜が得られる。実際、多層構造形成時には以下に述べるようにこれより低温の硬化条件を用いる。

BCB樹脂の硬化は熱のみによる重合反応であるため触媒や開始剤が必要ない。したがって、それらに起因する不純物が少なく、また、加熱硬化時に揮発性物質、特にポリイミドの硬化時にみられるような縮合水の発生がないため、配線材料の腐食などの心配がない。

Fig.2 Bis- vinylsiloxane benzocyclobutene

3. BCBポリマー物性

Tab.1に硬化したBCBポリマーの代表的な物性を掲げる。BCBの電気絶縁材料としての最大の特徴は電気特性がよいことである。特に、BCB絶縁薄膜はきわめて良好な誘電特性をもっており、Fig.3にBCB薄膜の比誘電率

Tab.1 Properties of cured BCB resin

誘電率 10kHz	2.7
誘電正接 10kHz	0.0008
絶縁破壊電圧	4.0×10 ³ V/cm
体積抵抗率 25℃	9.0×10 ¹⁹ Ωcm
熱膨張係数 TMA, 25~300℃	65~70ppm/℃
吸湿率 24hr, 100℃	0.23wt%
熱安定性 (窒素中)	350℃
ガラス転移温度 TMA	>350℃
曲げ弾性率 DMA, 25℃	475,000psi
ヤング率	340,000psi
屈折率	1.55

Fig.3 Dielectric constant vs. temperature and frequency

Fig.4 Dissipation factor vs. log (frequency)

Fig. 5 Moisture absorption vs. relative humidity

Fig. 6 The effect of relative humidity on dielectric constant

の温度と周波数に対する依存度を示すように、誘電率は室温から200℃まで1 kHz～1 MHzの範囲ではほぼ2.7の一定値をとり周波数依存性が少なく、非極性分子からなる材料の特徴を表している。Fig. 4に誘電正接の周波数依存性を示した。明らかに誘電正接も一般的ポリイミドと比べて1桁小さい値となっている。

吸湿率を沸騰水に24時間浸漬後の重量増加として測定した値は0.25%で非常に低い値を示す。この値はさらに湿度に依存した平衡値状態となっていることがFig. 5から明らかである。このように低い吸湿率を示すのは、BCBポリマーが非極性分子から成り立っているもうひとつの特徴である。低吸湿率は、製造プロセス上およびデバイスの信頼性に大きな有利性をもたらす。さらに、誘電率も湿度等に対して安定しており (Fig. 6参照)、この点についてもポリイミドに対して優位性をもっているといえる。

熱安定性についてはTGAで測定された結果をFig. 7に Vol. 7, No. 1

TGA scan of dielectric during heating at 10°C/min to 600°C

Fig. 7 Thermal stability of cured BCB resin

示す。窒素中では400℃まで重量減少がない。等温での重量減少をみると300℃、1,000minで1%, 350℃で5%の重量減少が観測される。

熱膨張係数が若干大きいことが心配される点であるが、弾性率が小さいため多層構造形成上問題になりにくいと考えられている。

4. 絶縁膜コーティング

薄膜絶縁層のコーティングには、BCBプレポリマのキシレンあるいはメシチレン溶液が使われる。重量濃度35～55%程度のものを膜厚や粘度の要求に応じて選択する。Fig. 8にBCBプレポリマのキシレン溶液の粘度と濃度の関係を示す。粘度は濃度に対して指数関数的に変化している。これは相溶し、粘度が大きく異なる典型的な2成分系の挙動である。この関係から濃度や粘度を広い範囲で変化させることが可能であり、絶縁薄膜の形成には標準的なスピコートで膜厚1～15μを得ることができる。スピコートで基板上に形成した膜は一度150℃位に加熱して、溶剤を除去した後、窒素雰囲気中で250℃で1時間の加熱によって完全硬化することができる。

多層構造を形成する際には、各BCB層間の密着性を上げる目的で最上層を210℃で30min程度加熱して、硬化度

Fig. 8 Variation of viscosity as a function of solids content in xylene

Fig. 9 BCB conversion (Calculated)

を70%位にしておく。この方法をとることによって、30%の未反応モノマーが上層を形成するときに反応しBCB層間の密着を高めることができる。このような方法がとれるのはBCBが硬化時に水分等揮発性物質の発生がないからである。後に層形成の最終段階で100%硬化させる必要がある。したがって、下層のBCB層ははじめ70%の硬化度から始まり上層が形成されるに従いゆっくりと硬化度を上げるため、硬化時に発生するストレスが低減すると考えられる。温度・加熱時間と硬化度の関係をFig. 9に示す。データはシミュレーションで求めた値とIRでの実測値を示してある。

BCB樹脂の硬化収縮度は溶剤除去後の値で4%（体積）を示し、BCB特有の開還付加重合によってポリイミドに比して小さい値を示す。

5. BCB薄膜による平坦化

BCB樹脂による膜形成において優れた平坦性が得られることも特徴のひとつである。たとえば、Fig. 10に示すように基板上の膜厚 $1.08\mu\text{m}$ 、線幅 $50\mu\text{m}$ のアルミニウム導線に $7.5\mu\text{m}$ 厚のBCB膜をスピコートで形成すると、表面の高低差が $0.055\mu\text{m}$ に減少することがわかる。この時の平坦化度（DOP）は、

$$(1.080 - 0.055) / 1.08 \times 100\% = 95\%$$

となり極めて良好な平坦性が得られる。DOPは線幅とスペースで変わり得るが、Tab. 2に示すように常に90%以上の値が得られ、コーティング作業を繰り返さずして良好な平坦性が得られる。

6. BCB薄膜のエッチング

硬化したBCB膜は種々の化学薬品に対して強い耐薬品性を示す。これはBCBモノマー分子が酸・アルカリにおかされにくい構造をとっているためである。したがって、ヴィアホールのエッチングはプラズマエッチングを用いて行う。BCBの組成中にはSiが含まれているためフ

Fig. 10 Planarization with BCB

Tab. 2 BCB step coverage

$t_f/t_{\text{metal}} (\mu\text{m})$	Linewidth (μm)	Spacing (μm)	DOP (%)
2.3	13	22	93
2.3	13	97	92
2.3	70	isolated	90

t_f = film thickness, t_{metal} = line thickness

t_s = step height, $\text{DOP} = (1 - (t_s/t_{\text{metal}})) \times 100$

ッ素系のエッチングガスが必要で、普通、ガスの組織には (O_2/CF_4) や (O_2/SF_6) が用いられる。Fig. 11にエッチング速度と (CF_4/O_2) 組成比を190mtorrと360mtorrの2つの圧力下で行った測定結果を示す通り、ドライエッチングによって、実用上十分なエッチング速度が得られる。

Fig. 11 (a) Etch Rate of BCB dielectrics films as a function of gas composition (O_2/CF_4) at an operating pressure190 mtorr.
(b) Etch Rate of BCB dielectric film as a function of gas composition (O_2/CF_4) at an operating pressure360 mtorr.

Fig. 12 BCB coating adherence

7. BCB薄膜の接着性

絶縁薄膜の金属 (Al, Cu) や基材 (セラミック, シリコンウェハ) に対する接着性は基板製作工程上, また, システムの信頼性に大きく影響するため材料選択上の非常に大きなファクタとなる。

普通, BCB薄膜と金属や基材に対する接着性を向上させるために接着助剤 (AP) を使用する。BCB樹脂をスピコート等でコートする直前に接着面に塗布し表面処理を行うものである。Fig. 12にBCBコーティング膜のアルミニウムとシリコンウェハ (酸化膜付き) とに対する接着性を, 接着助剤で表面処理した場合としない場合とで比較したデータを示してある。ここで用いられている接着力試験法は, スタッドプルテストと呼ばれる方法で接着面に対して垂直な荷重を加え接着界面が破壊されるまでの荷重を測定したものである。表面処理をすることによって接着力は大きく向上し, さらに熱湯浸漬後の接着

Fig. 13 Multilayer interconnect for Makintosh SE system board constructed on a Si wafer substrate

Fig. 14 Basic substrate layout

Fig. 15 Representation of four level structure

力も大幅に改善することが知られている。

8. BCBを用いた試作マルチチップモジュール

有機絶縁材料にBCB樹脂を使った試作MCMとしてアップル・コンピュータ社と米国ダウ・ケミカル社との共同開発によってMCM化されたマッキントッシュSEのシステムボード（1MBのメモリ含む¹¹⁾を紹介する（Fig. 13参照）。

Fig. 14にSi基板上に配置された部品のレイアウトを示す。システムクロックだけは基板上に搭載せず外部にして、クロック周波数の可変を可能にしてある。2.5インチ×2.5インチの基板には28個のICと約50個の受動部品が配置され、184のI/Oピンはアルミナパッケージのピンとワイヤボンデで接続される。このMCMに用いたデザインルールは次の通りである。

- A. ライン幅=22 μ m
- B. ライン厚=2 μ m
- C. 特性インピーダンス=40~100 Ω

酸化膜付きシリコンウェハ上に形成した基板構造は4層からなり、各BCB絶縁層の厚さは5.5 μ mとして設計のマイクロストリップラインのインピーダンスを得ている。導体にはアルミニウムを使いスパッタリングとエッチングでパターン形成している⁷⁾。最下層にグランド・プレーン、最上層にパワー・プレーンを配して、これらの間に2層のシグナル層を配置した構造となっている。この様子をFig. 15に示した。

9. 今後の開発課題

以上、述べてきたようにBCB樹脂は、ポリイミド等に比してMCM等の高密度多層配線基板材料として優れた物性と加工性をもっている新材料といえよう。しかしな

がら、今後、改善されるべき点として、低熱膨張化や可とう性、感光性を付与することが考えられる。

なお、本稿で述べたBCB樹脂は開発商品であり、商品化の時期等は現時点では未定である。

参考文献

- 1) J. Reche: "Multichip Modules: Buzzword or Bonanza?", Circuit Manufacturing, p.46 (June 1989)
- 2) J. Reche, P. Garrou, J. Carr, P. Townsend: "High Density Multichip Module Fabrication", Intl. J. Hybrid Microelectronics, 13 (1990)
- 3) R. J. Jensen, J. P. Cummings, and H. Vora: "Copper / polyimide Material Systems for High Performance Systems", IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol., Vol. CHMT-7, 384-393 (1984)
- 4) C. J. Bartlett, J. M. Selgelken, N. A. Teneketges: "Multichip Packaging Design for VLSI-based Systems", IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol., Vol. CHMT-10, 647-653 (1987)
- 5) R. W. Johnson, T. L. Phillips, S. F. Hahn, D. C. Burdeaux, and P. Townsend: "Multilayer Thin Film Hybrids on Silicon", Proc. 1988 Int. Symp. Microelectronics, 365-373 (1988)
- 6) J. Reche: "High Density Multichip Interconnect for Advanced Packaging", Proceedings of NEPCON (East), p.1002 (1989)
- 7) J. Reche: "Fabrication of High Density Multichip Modules", IEEE Trans CHMT, 13, 565 (1990)
- 8) I. L. Klundt: "Benzocyclobutene and its Derivatives", Chem. Rev., Vol. 70, 471 (1970); W. Oppolzer: "Intramolecular Cycloaddition Reactions of o-Quinodimethanes in Organic Synthesis", Synthesis, 793 (1978)
- 9) R. A. Kirchoff, C. E. Baker, J. A. Gilpin, S. F. Hahn, and A. K. Schrock: "Benzocyclobutenes in Polymer Synthesis", Proc. 18th Int. SAMPE Tech. Conf., 478-498 (1986)
- 10) R. W. Johnson, T. L. Phillips, W. K. Weidner, S. F. Hahn, D. C. Burdeaux, and P. H. Townsend: "Benzocyclobutene Interlayer Dielectrics for Thin Film Multichip Modules", IEEE Trans. Comp. Hybrids Manuf. Technol., Vol. 13, 347-351 (1990)
- 11) J. N. Carr, D. C. Burdeaux, P. H. Townsend, T. A. Manial, T. Tsao, T. Ritter, R. Lester: "Migration from Printed Wiring Board to Multichip Module Technology", The Dow Chemical Company, Technical Report (Feb. 1990)