パワーデバイスの封止樹脂技術

宝蔵寺 裕之*

Encapsulation Materials for Power Devices

Hiroshi HOZOJI*

* 株式会社日立製作所日立研究所材料研究センタ (〒319-1292 茨城県日立市大みか町7-1-1)

* Material Research Center, Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd. (7-1-1 Omika, Hitachi-shi, Ibaraki 319-1292)

1. はじめに

近年、地球温暖化、資源の有効活用の観点から、エネルギー利用に関する関心が高まり、自然エネルギーの有効利用および変換効率が各分野で重視されるようになってきた。自動車や鉄道などの分野においては内燃機関とモータを組み合わせることで内燃機関の燃料消費量と二酸化炭素の排出量を低減させる、ハイブリッド技術が注目されるようになっている。そこで、これらエネルギー機器の電力変換に用いるパワーデバイスを用いたパワーエレクトロニクス技術がますます重要になっている。

本稿では、このような環境問題解決の施策を支えるパワーエレクトロニクス機器向け実装技術の1つとして、機器の信頼性、小型化を実現するうえで重要な封止樹脂技術について述べる。

2. 封止樹脂の役割

半導体素子を封止する樹脂の役割は、半導体素子およびパッケージ内の接続部を機械的あるいは化学的なストレス

から保護する役割を担っている。パワーデバイス機器にどのような封止樹脂を使用するかは、ほぼ構成するデバイスの容量によって異なる。図1に、パワーデバイスを用いた機器の容量とこれに用いる封止樹脂を示す。デバイスの電圧が数Vから1kV付近までは、メモリやマイコンなどのパッケージに用いられているものと同様の、硬質のエポキシ系半導体用封止樹脂が適用されている(図2)。一方、1kVを超える高電圧系のパワーデバイス機器ではサイズが大きくなり、硬質樹脂の封止は熱応力の観点で厳しくなる。そこで電圧が1kV付近よりも大きいパワーデバイス機器では、おもにシリコンゲル封止が用いられている(図3)。一般的なエポキシ系半導体用封止樹脂の弾性率は10～30 GPa程度であるが、シリコンゲルでは10～

図2. エポキシ系半導体樹脂封止構造のパワーデバイス機器の断面概略

図3. シリコンゲル封止構造のパワーデバイス機器の断面概略

図1. パワーエレクトロニクス機器の容量と封止樹脂

40 MPaと約3桁も低く、熱応力の低減に有効なことがわかる。以下に、それぞれの封止樹脂をパワーエレクトロニクス機器に適用した場合の信頼性について、簡単にまとめる。

3. エポキシ系半導体用封止樹脂の信頼性

3.1 温度負荷信頼性

耐圧1kV以下のデバイス機器のなかで、近年特に導入が拡大しているのは、自動車分野である。内燃機関による駆動方式を、モータを併用した駆動方式やモータ単独で駆動する方式の導入が加速され、モータの駆動制御へのパワーデバイス機器が導入されている。自動車分野では、機器のサイズや重量が燃費や駆動性能に大きな影響を与える。高効率な電力制御システムを実現するため、パワーデバイス機器の小型化が進み、出力密度が年々増加している。そのためパワーデバイスの電流密度も高くなり、デバイス温度が高くなる。その結果、ワイヤボンディングやんだ付け部分の信頼性確保が重要な課題となってきた。

パッケージの構成材料の熱膨張差によって生じる応力に起因する接合部や材料強度にかかわる信頼性を評価する方法として、温度サイクル試験が一般的である。図2および図3に示すパワーデバイス機器において、温度サイクル試験時の機器の各部の温度プロファイルは、図4(a)に示すように、パワーデバイスのジャンクション部 (T_j)、ケース (T_c) などが高温、低温それぞれの規定温度になるように時間設定される。しかし、パワーデバイス機器は実際の稼動状態では、ケースや放熱部分 (T_c) は水や空気中で冷却されれば一定の温度であるが、デバイスのジャンクション部の温度 (T_j) は電流のオン・オフにより急激に変化し、パッケージ内部では、熱膨張係数と温度の違いによるひず

みが生じる。そこで、実際の機器稼動状態を模擬した方法として、パワーサイクル試験が行われる。パワーサイクル試験は、通電電流を短時間でオン・オフし、図4(b)に示すようにデバイスのジャンクション部の温度のみを変化させる方法である¹⁾。

自動車分野では通電電流密度が高く、デバイスのジャンクション温度も高くなる。そこで、デバイスとワイヤボンディングやダイアタッチ部との接続信頼性確保を目的として、メモリやマイコンなどで用いられているものと同様なエポキシ系半導体樹脂による封止が用いられている。硬質の樹脂で接合部を封止することにより、接合部に生じるひずみを低減し信頼性の向上を図っている^{2),3)}。

硬質の樹脂封止パッケージにおいて、デバイスの電極接合部の信頼性を確保するためには、硬質樹脂と基板などの接着性を保つことが重要である。半導体のパッケージでは、ワイヤボンディング性、はんだ付け性、防食性などを確保するため基板の配線部やリードフレームにNiめっきを施す場合が多い。一般的にNiめっきは封止樹脂との接着性が悪い。そこで接着性を向上させる方法として、エッチングなどによる金属表面に微細な凹凸を形成し機械的な接合状態を形成する方法や、金属表面に樹脂と化学的な結合を形成させるカップリング剤処理やプライマー処理を行う方法がある⁴⁾。しかし、これらの方法は銅やアルミニウムには有効であるが、半導体製品に多く使用されているNi面への有効な粗化手法ではなかった。そこで、Niめっき面に対する樹脂接着性向上の新たな手法として、Ni表面に微細な凹凸を有する有機亜鉛の焼成膜を形成し、樹脂

図4. 試験方法と温度プロファイル

図5. Ni面およびZn焼成処理後の接着強度⁵⁾

との接着性を向上する手法を開発した⁵⁾。図5および図6は、Ni基板上に有機亜鉛を焼成処理し、エポキシ系半導体封止樹脂との接着性を評価した結果である。樹脂とほとんど接着強度を示さないNi膜面に対し、有機亜鉛焼成処理膜の形成により、せん断強度が向上し十分な接着力が得られ、Zn焼成膜処理の破断面には樹脂が密着し、未処理のNi面に対し樹脂の密着性が良いことがわかる。

3.2 絶縁信頼性

パワーデバイス機器の信頼性で、特に重要なのは絶縁信

頼性である。樹脂封止された端子やリードフレーム、デバイスと封止樹脂が剥離すると、端子間に十分な絶縁距離が確保されていない場合には短絡が生じる可能性がある。また、封止樹脂を介して電極端子間に部分的な電界集中があると、電圧集中部から部分的な放電が生じ、そこから放電トリヤが成長して絶縁破壊に至る場合がある。このような、部分放電による放電トリヤの成長を抑える方法として、図7に示すようなエポキシ樹脂中にナノサイズや平板状のフィラーを配合して、トリヤの放電経路を迂回させる手法が検討されている^{6)~9)}。

4. シリコンゲル封止樹脂信頼性

シリコンゲルは密着性に優れていることから、使用環境下での温度変化においても剥離が生じにくく、封止界面での絶縁破壊を起こしにくいという特徴がある。また、シリコンゲルの主成分であるSi-Oの結合エネルギー(約100cal/mol)は、エポキシ樹脂などの主成分であるC-Cの結合エネルギー(約80kcal/mol)に比べて大きく、耐熱性に優れている材料であることから、高圧のパワーデバイス機器に広く適用されている。

4.1 振動信頼性

前述したように、シリコンゲルはエポキシ樹脂系半導体封止樹脂に比べ弾性率が約3桁小さい。そこで、振動環境下のシリコンゲル封止型のパッケージでは、ゲルの加振によるワイヤボンディング疲労を考慮する必要がある。竹田ら^{10),11)}は、ゲル封止されたパッケージの振動環境下におけるワイヤボンディングの疲労解析を行い、ワイヤの直径が大きくゲルが厚いほどひずみが大きく、これらが破断寿命に大きく影響することを明らかにしている。自動車のように、加減速が激しく、エンジンなどの振動が加わる部位にシリコンゲル封止型のパワーデバイス機器を搭載する場合には注意が必要である。

4.2 高温信頼性

シリコンゲルは密着性、耐熱性、絶縁性に優れているが、長期の温度サイクル試験や高温放置によって少しずつ劣化が進み、硬くなる。その結果、シリコンゲルのパルククラックや、基板、パワーデバイス界面で剥離が生じる。基板の電極間やデバイス端部の界面で剥離が生じると、絶縁破壊に至る可能性がある。シリコンゲルは非常に柔らかいため一般的なゴム硬度で硬さを測定することができない。そこで、硬化後のシリコンゲル一定荷重で針を押し当て、その沈み込み量(針入度)で硬さを評価している。一般的なシリコンゲルは、150℃以上の高温で長時間放置すると針入度が小さくなり硬くなるが、近年シリコンゲルの主骨格となるポリシロキサン(架橋構造)の改良を行い、180℃以上の雰囲気でも1,000時間放置しても硬さ(針入度)が変化しにくいゲルが開発されている^{12),13)}。

図6. 接着部のせん断破断面観察例⁵⁾

図7. 樹脂中に分散した有機化層状シリケート化合物による電気トリヤ分岐の模式図⁷⁾

(a)2m30s・6kV

(b)3m45s・7.5kV

(c)4m20s・9kV

(d)5m20s・10.5kV

図8. シリコンゲル中のトリーの伸展挙動¹⁴⁾

4.3 絶縁信頼性

シリコンゲルもエポキシ系封止樹脂と同様に電界集中による部分放電が発生する。シリコンゲル中の放電進展は、まず電界集中部に暗電流が流れ、そのジュール熱により気化現象が起こり、発生したバブルの先端が新たな暗電流集中点となって放電路が進展すると考えられている(図8)。ゲル中のバブルの伸展は放電トリーを成長させる一方で、大きなバブルはその進展過程で放電路を切断し、トリーの成長を止めているという報告がある¹⁴⁾。このようなバブル発生挙動は、シリコンゲルの主成分であるポリシロキサンの架橋状態によって異なり、低架橋ではバブルが発生しやすくなる。架橋状態はシリコンゲルの耐熱性や絶縁破壊強度にも影響を与えるため、適用するパワーデバイス機器の仕様に応じた材料選定が必要である。

5. 次世代パワーデバイスの封止樹脂技術

パワーデバイス機器の分野では、次世代のデバイスとしてシリコンカーバイド (SiC) や窒化ガリウム (GaN) に代表されるワイドバンドギャップ半導体が注目されている。SiCはSiに比べ約10倍の絶縁破壊強度を示すことから、デバイスの薄型化による低オン抵抗化が可能であり、耐熱性が高いことから、デバイスに流れる電流密度を高くしてデバイスサイズや機器の小型化が可能となる。しかし、このような小型化、高効率化に有利なSiCデバイスを使いこなすためには、これを封止する樹脂にも、高い耐熱性、絶縁性が要求される。耐熱性に関しては、硬質の封止樹脂として、有機分子と無機ナノ成分の界面相互作用を最適化し、硬化過程では独立した架橋反応を進行させ、均一な網目構造を形成することにより250°Cを超えるガラス転移温度と耐熱性を確保する材料が開発されている¹⁵⁾。さらにゴム状の封止樹脂では、ポリシロキサンと無機微粒子の複合化を利用し高耐熱化を図る手法が取られている¹⁶⁾。さらにシリコンゲル封止材では、ゴム状封止樹脂で開発した手法を応用し、架橋成分の均一化を図ったシリコンゲルが開発されている^{17),18)}。いずれの手法もナノレベルでの架橋状態、均一性などの制御がキー技術となっている。

一方、サイズの小さい次世代デバイスでは端子や電極間隔が狭くなり、中低圧であっても絶縁破壊を起こしやすくなる。したがって、より高い絶縁破壊強度を有する封止樹脂の開発が必要である。

6. おわりに

1997年に開催された地球温暖化防止京都会議 (COP3) 以降、二酸化炭素削減を目指したエネルギーシステムが注目されている¹⁹⁾。エネルギー創生の分野では、太陽光発電システムや風力発電システムが注目され、燃料電池などと組み合わせることで安定な電源供給源システムとして展開されることが期待されている。また、エネルギー利用の分野では、内燃機関を動力源とする車両では、排出ガスの低減、燃費向上を目的として、内燃機関とモータを組み合わせたハイブリッド技術や、内燃機関からモータへの転換がますます加速している。これらのシステムにおいて、パワーデバイス機器の信頼性確保は今後ますます重要になっている。封止樹脂は、パワーデバイス機器の分野で特に重要な絶縁を確保する材料であり、今後、使用環境の拡大、小型化、高パワー密度化に対応して、より高温、高電圧での信頼性が要求される。これまで情報機器向けに適用された信頼性設計手法に加え、高電圧、大電流、高温での材料挙動を考慮した信頼性設計手法の確立が重要である。

(2012.6.5-受理)

文 献

- 1) 内田 誠, 井上和美: “パワーデバイスの信頼性試験動向,” 三菱電機技報, Vol. **75**, No. 6, pp. 425-428, 2001
- 2) 中島 泰, 杉本昭雄: “パワーモジュールの信頼性向上技術,” 三菱電機技報, Vol. **81**, No. 12, pp. 799-802, 2007
- 3) 加柴良裕: “パワーモジュールのワイヤボンダ部およびはんだ付部の信頼性,” 溶接技術, 2009年8月号, pp. 66-69, 2009
- 4) 前田重義: “金属の接着,” 接着の技術, Vol. **13**, No. 1, pp. 1-15, 1993
- 5) 梶原良一, 元脇成久, 浅海勇介: “有機Znの焼成による金属と樹脂の高接着化技術,” 17th Symposium on “Microjoining and Assembly Technology in Electronics,” 17, pp. 239-244, 2011
- 6) 飯塚智徳, 内田克己, 田中祀捷: “エポキシ/シリカナノコンポジットにおける耐電界特性,” IEEJ Trans. FM, Vol. **129**, No. 3, pp. 123-129, 2009
- 7) 今井隆浩, 澤 史雄, 尾崎多文, 中野俊之, 清水敏夫, 吉満哲夫: “エポキシ樹脂のナノコンポジット化とその絶縁特性の検討,” IEEJ Trans. FM, Vol. **124**, No. 11, pp. 1065-1072, 2004
- 8) T. Tanaka, Y. Matsuo, and K. Uchida: “Partial Discharge Endurance of Epoxy/SiC Nanocomposite,” Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena, Vol. **2008**, pp. 13-16, 2008
- 9) R. C. Smith, C. Liang, M. Landry, J. K. Nelson, and L. S. Schadler: “The Mechanism Leading to the Useful Electrical Properties of Polymer Nanodielectrics,” IEEE Transaction on Dielectrical Insulation, Vol. **15**, No. 1, pp. 187-196, 2008
- 10) 竹田憲生, 成瀬友博, 服部敏雄, 大野啓充: “シリコーンゲルで封止されたワイヤの振動解析,” 材料, Vol. **50**, No. 12, pp. 1305-1310, 2001
- 11) 竹田憲生, 成瀬友博, 河野賢哉, 服部敏雄: “シリコーンゲルで封止されたワイヤの振動環境下の疲労強度評価法,” 材料, Vol. **52**, No. 2, pp. 204-209, 2003
- 12) 両角 朗, 西村芳孝, 西浦 彰: “電気自動車用高信頼パワーモジュール技術,” 富士時報, Vol. **76**, No. 10, pp. 630-633, 2003
- 13) “高耐熱・耐寒性シリコーンゲル封止材料,” 信越化学工業シリコーンニュース, No. 129, p. 4, 2012
- 14) 赤松翔太, 藤井雅治, 井堀春夫: “交流電界下での固体/ゲル/液体中での放電現象,” 電気学会パルスパワー研究会資料, 11(25-33), pp. 1-5, 2011
- 15) “SiCパワー半導体向け高耐熱封止材を開発,” 日本触媒, プレスリリース, 2012年1月18日
- 16) “400°Cに耐える高耐熱絶縁樹脂「ナノテクレジン KA-100」の開発について,” 旭電化工業株式会社, プレスリリース, 2005年4月26日
- 17) “次世代パワー半導体向け新技術を開発,” 東レ・ダウコーニング, プレスリリース, 2010年2月10日
- 18) 日渡謙一郎: “～EV・HEV用次世代パワーデバイスSiCに対応する～耐熱絶縁封止材料,” Material Stage, Vol. **11**, No. 4, pp. 13-15, 2011
- 19) 環境省, <http://www.env.go.jp/earth/info/80vision/index.html>

著者紹介

宝蔵寺裕之 (ほうぞうじ ひろし)
 昭和59年 電気通信大学材料科学専攻 修士課程修了。
 同年4月 (株)日立製作所入社。半導体封止用樹脂の研究開発。多ピンパッケージ, ウエハプロセスパッケージ, ミューチップ, パワーデバイスパッケージの実装開発に従事。
 博士 (工学)。