

スマートコミュニティを支える機能性材料

Functional Materials for the Smart Community

稲田 禎一 *Teiichi Inada*

新事業本部 筑波総合研究所 基盤技術開発センタ

再生可能エネルギーを含むスマートコミュニティの確立には、送電ネットワーク管理などの電力システムの制御技術だけでなく、パワー半導体技術、再生可能エネルギー関連技術などの幅広い技術が求められる。当社はこれらに向けた炭化ケイ素単結晶、耐熱実装材料、放熱材料、太陽電池向け材料など多数の新材料を開発するとともに、材料の組み合わせ提案を行うことで、スマートコミュニティの実現に寄与している。これらの概略について述べるとともに、材料の供給安定性を高めるための取り組みについて述べる。

Establishing a smart community containing renewable energy requires many technologies, e.g. power transmission network and power electronics technologies, as well as renewable energy. Hitachi Chemical has developed many kinds of functional material, including silicon carbide single crystal, thermally-conductive materials and solar cell related materials towards the realization of a smart community. In this paper, their features and applications are described.

1 緒言

電気エネルギーの源に何をを選ぶか、地球温暖化の問題にどう対処して行くか、この答えを得るにはまだ時間がかかると思われる。このため、現時点では、得られたエネルギーをいかに有効に使うかについての最適解を探す必要がある。その解の1つがスマートコミュニティの実現である。すなわち、送電ネットワーク管理などの電力システムの制御技術、情報通信技術、パワーエレクトロニクス技術、蓄電技術、再生可能エネルギー技術を駆使して効率良く、安全で信頼性の高い電力システムを作ることである。当社はスマートコミュニティの実現に向けて幅広く機能性材料を提案している。本報では、このうちパワーエレクトロニクス用材料と再生可能エネルギー関連材料についての当社の取り組みと将来像について述べる。

2 パワーエレクトロニクス用材料

送電ネットワークや電気自動車、エアコンなどの機器の効率化には高効率なパワー半導体が欠かせない。炭化ケイ素(SiC)はシリコン(Si)と比較して3倍の禁制帯幅、10倍の絶縁破壊強度と3倍の熱伝導性を有することから、その絶縁、放熱特性を生かしてインバータを大幅に小型化、高効率化できると期待されている。SiCは図1に示すようにSiとCがsp³混成軌道を形成することにより、若干のイオン結合性を有する共有結合で結ばれた構造を形成する。このSiとCの積層配列の仕方には多様性があるため、170種類以上とも言われる多数の結晶形態(ポリタイプ)を生じる。SiC単結晶ウエハーを得るためにはこのポリタイプをいかに制御するかが鍵となる。

当社はこれまで多数のSiC多結晶製品群を開発、上市しており、この製造で培った超高温(1500℃以上)プロセス技術を生かして、現在、熱的平衡状態近傍での理想的な結晶成長が可能な溶液成長法(図1)によるSiC単結晶ウエハーの開発を進めている。SiCの実力を十分発現させるためには、結晶型をキャリア移動度が高い4H構造に精密制御し、かつマイクロパイブ欠陥などデバイス性能に悪影響を及ぼす結晶欠陥を抑制する必要がある。

当社は、2009年より技術研究組合次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構(FUPET)に参加し、産業技術総合研究所や東工大、名古屋大と共同で高品質のSiCの開発に取り組んでいる。原理確認を既に完了し、大径ウエハーの作成に着手している¹⁾。

SiCはSiに比べて高温での作動が可能であるため、冷却システムが簡易になるというメリットもある。しかし、それを実現するには、高い作動温度に耐える実装材料が必要になってくる。当社

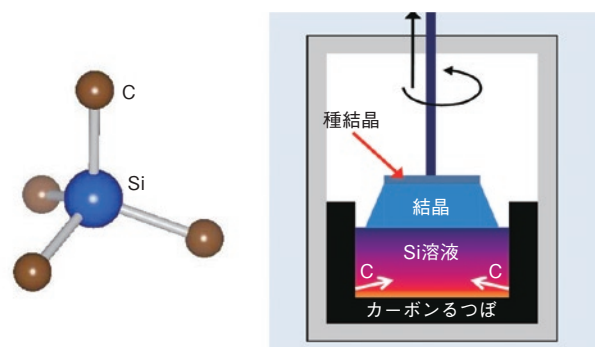


図1 SiCの基本ユニットと溶液成長法溶液法による4H-SiC結晶作成技術

Figure1 SiC structural unit and the method of growing single crystal SiC from solution

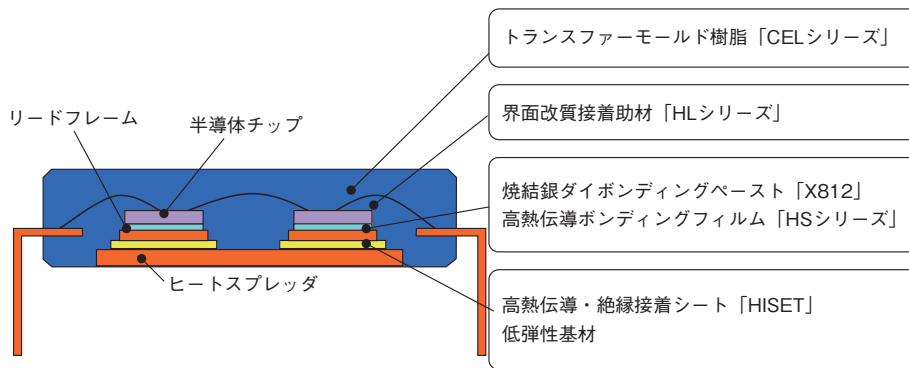


図2 当社の代表的なパワーモジュール用材料
Figure 2 Hitachi chemical's technology for power module package

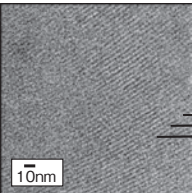

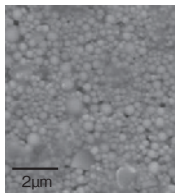
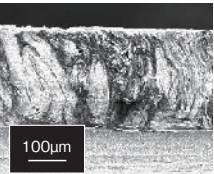

<h3>高熱伝導化樹脂</h3>  <ul style="list-style-type: none"> ・ ナノ構造制御材料 ・ 分子設計技術  <p>熱伝導率従来比5倍</p>	<h3>フィラーの高充填化</h3> <ul style="list-style-type: none"> ・ 粒径制御技術 ・ 分散剤技術 ・ 分散プロセス技術 
<h3>構造異方配向制御</h3>  <ul style="list-style-type: none"> ・ 配向制御技術 ・ 柔軟樹脂技術 ・ 高熱伝導黒鉛 <p>熱伝導率従来比100倍</p>	<h3>樹脂薄膜化技術</h3>  <ul style="list-style-type: none"> ・ 高接着化技術 ・ 製膜技術 ・ 高機能樹脂技術 (強度, 柔軟性, 耐熱性)

図3 当社の高熱伝導化の技術
Figure 3 The key technologies of Hitachi Chemical

はこれまで培った熱硬化性樹脂技術を生かして超耐熱封止材料などを開発しているほか、高温使用に耐え熱伝導性に優れる焼結銀ペーストなど、有機材料に限らない耐久性の高い接合材料の開発を行っている(図2)。

また、パワー半導体は大電流を制御した際、多量の熱を生じる。この熱の放散も極めて重要な課題である。当社はパワー半導体実装に適用可能な多数の放熱材料を既に開発・上市している。その基盤技術として図3に示すような種々の独自技術を有している。このうち、株式会社日立製作所と共同で開発したメソゲン骨格エポキシ樹脂²⁾と当社独自の硬化剤技術、セラミックス系フィラーの高充填技術を組み合わせた絶縁接着シート³⁻⁵⁾は、熱伝導率が5~15 W/m・Kであり、パワーモジュールなどの用途に適用されている。この接着シートは、基板と半導体チップを接続する絶縁部材として使用されるため、界面での強固な接着が求められる。一方で、半導体素子とヒートシンク間の接続部材では、熱変形に追従する柔軟性が必要である。そこで、図4に示す薄片状で高い熱伝導率を有する黒鉛粒子と柔軟樹脂を用いた高熱伝導のクッションシート(TCシリーズ)を開発した^{6,7)}。黒鉛粒子の結晶面は理論上数千W/m・K以上の熱伝導率を持つ。TCシリーズでは、当社独自の配向プロセスによって、黒鉛粒子の多くの結晶面が垂直方向に配向している。その結果、TCシリーズは、従来の球状黒鉛粒子を用いた場合や鱗片状粒子が横配向した場合に比べて、数十倍の熱伝導性を発現する⁴⁾。さらに、独自開発の鱗片状黒鉛粒子は柔軟で変形しやすいため、シートは柔軟で凹凸に追従・密着しやすい。その結果、界面で熱を確実に伝えることができるほか、応力緩和性に優れる。従来使用されるペースト状の接続部材(グリース)では、発熱温度が高まるとともにポンプアウトが発生し、界面の接続信頼性の劣化が問題となるが、TCシリーズはシート形状をしているためポンプアウトの発生はなく、長時間、その形状を維持することが可能である。現在、高性能サーバのCPU(Central Processing Unit)からの熱放散に適用されているほか、パワーモジュールが生じる熱を伝える用途にも検討が進んでいる。

他にも、当社独自の材料技術を組み合わせて、種々の熱関連材料を開発上市している⁸⁾。例えば、昨今の省エネルギー化

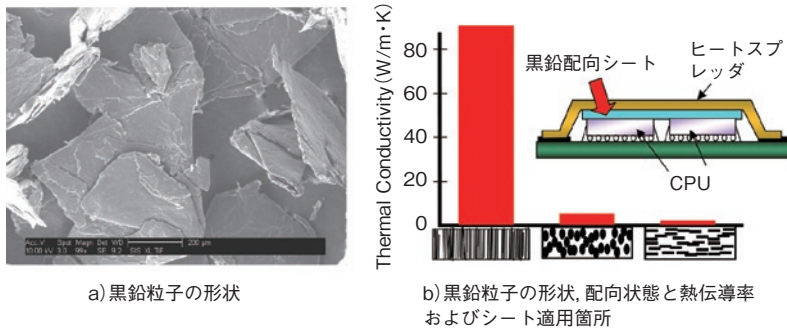


図4 黒鉛粒子形状と熱伝導率、シートの適用例

Figure 4 Picture of graphite particles, thermal conductivity of sheets and example applications

の要請からLED照明への流れが加速しているが、LED照明に適用可能な放熱部材として、薄く放熱性・加工性に優れたフレキシブル放熱基板MCF-5000Iを上市している。また、これにあらかじめ耐熱粘着層をラミネートしたフレキシブル放熱基板(HT-9000ITM)は、従来のように個片化した基板に粘着層を貼付する手間がなく、基板製造プロセスを簡略化できる。さらに、放熱塗料、断熱材など熱をコントロールするさまざまな材料を提案している。

また、最近では、これら材料の最適な組み合わせ提案が求められている。そのためには、絶縁信頼性、耐久性、熱物性の評価技術ならびにシミュレーション技術が欠かせない。当社は長年培ってきた実装材料のMaterial System Solution (MSS)技術⁹⁾をサーマルマネジメント材料へ展開し、材料の最適な組み合わせ提案を始めている。

3 再生可能エネルギー関連材料

現在、再生可能エネルギーの効率を高めて、経済性を改善する努力が求められている。再生可能エネルギーの中でも、太陽電池は機械部品がなく、メンテナンスが容易であるため、小型分散型の電源として有望である。当社は太陽電池用材料として、太陽電池セル上の電極と集電用タブ線とを低温接続可能なんだ代替の導電フィルムCFシリーズ、バスバー電極(銀ペースト)の削減を可能にする導電ペーストCP-300などを上市しており、製造プロセスの簡略化と反りや割れの抑制に役立っている。

また、これまで培ったプリンタブル機能材料の知見を生かして効率向上に寄与するドーピングペーストYT-2100-Nを開発、上市した。このペーストは図5に示すようなリン含有複合酸化物を含む高粘度のペーストであり、スクリーン印刷可能である。このペーストを塗布した後、900℃付近で熱処理することで、必要な箇所に必要量のリンをドーピングすることができる。それにより変換効率向上が可能であるうえ、従来の POCl_3 ガスおよびレジストを用いたエッチングプロセスに比べて大幅なプロセスの簡略化が可能になった。

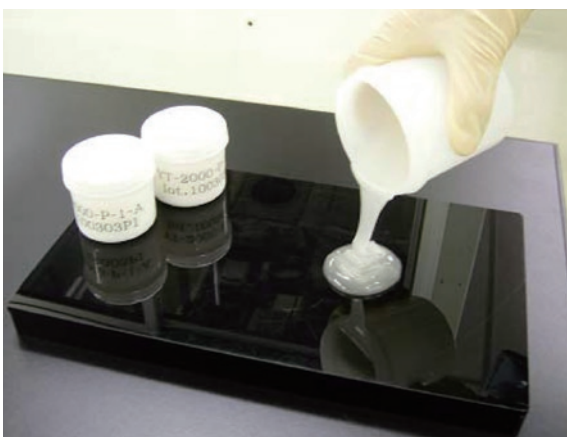


図5 ドーピングペーストYT-2100-Nの外観と特性

Figure 5 General properties of the YT-2100-N doping paste

項目	単位	特性
粘度(25℃)	Pa·s	10-100
チクソインデックス	—	1.6
印刷配線幅(150μm幅マスク使用時)	μm	220
灰分(400℃加熱後)	%	10
シート抵抗値(900℃, 10min焼成後)	Ω/cm ²	45以下

4 スマートコミュニティ関連材料の将来像 ～安定供給性の確保に向けた取り組み～

東日本大震災で改めて浮き彫りになったことの1つに、素材の供給停止リスクがある。高度に効率化、集積化された半導体や自動車産業では、1つの素材や部品の供給が止まっただけで大きな影響が生じる。上記の材料群についても、原材料の供給停止のリスクが常にあるため、それに対するロバスト性を考慮した配合設計が必要である。大規模な災害により原材料の供給が複数停止した場合でも代替品を用いて材料供給ができるような高い供給安定性が求められており、我々は日々代替材料の合成、探索を続けている。

これらの取り組みに加えて、供給安定性をより定量的に評価するシステムの構築に産業技術大学院大学の松尾教授と共同で取り組んでいる。これまでに目標値を満たす新規な配合探索手法(弱条件組み合わせ線形計画法)とソフトウェアを開発した¹⁰⁻¹²⁾。その結果、目標値を満たす素材の組み合わせや設計自由度がどの程度あるかを評価することが可能になったほか、材料の供給リスクを加味して製品の供給リスクも算定できるようになった^{13, 14)}。この手法をソフトウェアの開発により使いやすくしたうえで、製品開発に適用することを試みている。このような地道な技術蓄積により、製品の供給安定性を高めていき、インフラストラクチャを支える材料として供給安定性を高めていきたいと考えている。

5 結 言

地球温暖化の問題、震災による原子力発電所の事故と電力不足の問題など、課題は山積みであり、太陽電池などの自然エネルギーを含むスマートコミュニティの確立が求められている。我々は熱力学、分析化学、材料科学、情報科学をベースに地道な技術の積み上げを続け、優れたパワーエレクトロニクス、再生エネルギー関連材料を1つでも多く提案していくとともに、地球温暖化をはじめとする環境問題に寄与していく所存である。

【参考文献】

- 1) 「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」事業原簿(公開版)2012/8
- 2) M. Akatsuka, Y. Takezawa : Study of high thermal conductive epoxy resins containing controlled high-order structures, *J.appl. Polym. Sci.*, 89(9), pp.2464-2467(2003)
- 3) 竹澤由高 : 自己配列によって高次構造を制御した高熱伝導エポキシ樹脂, 絶縁性と高熱伝導性を両立したコンポジット材料と放熱材料テクノロジー, 日立化成テクニカルレポート, 53, pp.5-10(2009)
- 4) 竹澤由高 : 絶縁エポキシ樹脂のランダム自己配列型高次構造制御による高熱伝導化, *高分子* 59(2), pp.81-84(2010)
- 5) 宮崎靖夫, 福島敬二, 片桐純一, 西山智雄, 高橋裕之, 竹澤由高, “高次構造制御エポキシ樹脂を用いた高熱伝導コンポジット”, *ネットワークポリマー*, 29(4), pp.216-221(2008)
- 6) 山本礼, 吉田優香, 吉川徹, 矢嶋倫明, 関智憲, “黒鉛粒子配向制御によるフレキシブル高熱伝導シート”, 日立化成テクニカルレポート, 53, pp.11-16(2009-10)
- 7) 山本礼, 吉田優香, 吉川徹, 矢嶋倫明, 関智憲, “黒鉛粒子配向制御によるコンポジットシートの高熱伝導化”, *エレクトロニクス実装学会誌*, Vol.13, No.6, pp.462-468(2010)
- 8) 稲田禎一 : サーマルマネジメント材料, 日立化成テクニカルレポート, 54, pp.6-12(2011)
- 9) 安田雅昭 : 電子機器用実装材料システム, 日立化成テクニカルレポート, 40, pp.7-12(2003-1)
- 10) 稲田禎一, 松尾徳朗 : 弱条件組合せ線形計画法による熱硬化系接着フィルムの特性予測:ネットワークポリマー, 36, pp.2-10(2010)
- 11) 稲田禎一, 村形晃規, 松尾徳朗 : 弱条件組合せ線形計画に基づく材料設計支援システム, *パーソナルコンピュータ利用技術学会論文誌* 6, 1, 30-35(2012)
- 12) Teiichi Inada, Koki Murakata and Tokuro Matsuo: Property Design and Optimization of Die-bonding Film for 3D package, Science & Engineering Research support society, The 2012 International Conference on Advanced Information Technology and Sensor Application(2012-2)
- 13) 稲田禎一, 松尾徳朗 : べき集合の要素を変数とする関数を用いた材料供給リスク算出, 第7回 パーソナルコンピュータ利用技術学会全国大会予稿集, 2012/11/25
- 14) 稲田禎一 : プログラムドマテリアル開発のための計算論的近最適集合解析に関する研究, 山形大学博士論文, 2012/9