

特集「次世代半導体を支える粉体技術」を企画して

特集担当編集委員 金井 和章、井上 義之

近年、半導体産業は大きな転換点を迎えている。AI、IoT、5G/6G、自動運転、再生可能エネルギーなどの急速な発展に伴い、半導体には高集積化、高性能化、低消費電力化を同時に実現することが求められている。前工程における微細化が引き続き進展する一方、チップレットや2.5D・3D実装などの先端パッケージ、SiCやGaNを用いたパワー半導体、さらにそれらを支える製造装置や実装材料の重要性も高まっている。

半導体の技術革新というと、微細加工技術や回路設計、デバイス構造が注目されがちである。しかし、半導体の製造と実装の各工程を見渡すと、その根幹には多様な粉体材料と粉体プロセスが存在している。ウエハ表面を原子レベルに近い精度で平坦化するCMPスラリー、パッケージの反りや熱応力を抑える封止材料用フィラー、導電・接合・光学機能を担うナノ粒子、微細配線を形成する機能性インク、製造装置部材をつくる積層造形用金属粉末など、粉体技術は半導体産業の広い領域を支えている。

これらの材料では、単に粒子を微細化するだけでなく、粒子径と粒子径分布、形状、表面・界面、分散、充填、乾燥、焼結などを総合的に制御し、最終製品に必要な機能へ結び付けることが重要となる。

そこで本特集では、「次世代半導体を支える粉体技術」をテーマとして、半導体の前工程から後工程、パッケージング、実装、関連機能材料、製造装置部材に至るまで、第一線で研究開発に携わる方々に執筆いただいた。各稿を通じて、粉体技術が半導体の性能、信頼性、生産性および新たな機能の創出にどのように貢献しているかを俯瞰したい。

九州工業大学の鈴木恵友氏には、「半導体プロセスにおけるCMP技術の適用」と題して執筆いただいた。CMPは、化学反応と機械的作用を組み合わせ、半導体基板やデバイス表面を無欠陥かつ高精度に平坦化する技術である。本稿では、CMPが絶縁膜の平坦化からタングステンコンタクト、銅配線のダマシンプロセスへと適用範囲を広げ、半導体製造に不可欠な基盤技術へ発展してきた経緯について、量産立ち上げの経験を交えて解説されている。配線密度や材料の違いに起因するディッシング、エロージョン、面内均一性などの課題に対し、スラリー、ポリシングパッド、装置、終点検出、洗浄および工程管理を一体として最適化する必要性が示されている。また、先端パッケージにおける厚膜銅の高速・高均一研磨、SiCやGaNなどの難加工基板、フラーレンを用いた研磨微粒子、イオン注入を援用した加工技術など、次世代CMPの研究動向も紹介されている。粉体である研磨微粒子の機能を、化学作用や装置・工程条件と結び付ける総合的な技術の重要性を理解できる内容である。

三菱ケミカル株式会社の弓削哲治氏には、「負熱膨張フィラーによる低CTE封止材料への展開」と題して執筆いただいた。生成AIや高性能コンピューティングの拡大に伴い、複数のチップや高帯域幅メモリを集積する先端パッケージでは、異種材料間の熱膨張差による反り、界面剥離、微細接続部の疲労が重要な課題となる。封止材料の低CTE化には一般にシリカフィラーの高充填化が用いられるが、充填率の増加は粘度上昇や狭ギャップへの浸透性低下を招く。本稿では、加熱により収縮する負熱膨張材料をフィラーとして利用し、より低い充填率でも樹脂の熱膨張を抑制する考え方が紹介されている。さらに、負熱膨張という結晶物性だけでなく、合成段階での球状化と粒子径分布の制御、低比重を活かした沈降抑制、シランカップリング剤による表面改質を組み合わせることで、低CTE化と分散性、流動性、狭ギャップ浸透性を両立する可能性が示されている。機能性結晶を実用的な封止材料へ展開するために、粒子形態と界面を設計する粉体技術が不可欠であることが分かる。

東京大学の松井裕章氏には、「酸化物半導体ナノ粒子の表面構造制御と透明反射遮熱への応用」と題して執筆いただいた。透明性を維持しながら太陽光に含まれる近赤外光を反射する遮熱窓は、建築物や車両の省エネルギー化に有用である。一方、金属薄膜を用いる従来技術では、近赤外光だけでなく情報通信に用いる電波も遮蔽することが課題となる。本稿では、Sn添加In₂O₃、すなわちITOナノ粒子に生じる局在プラズモン共鳴を利用した透明反射遮熱フィルムが紹介されている。ITOナノ粒子の電子濃度、

粒子形状、表面を被覆する有機分子、粒子間のナノギャップを制御することで、近赤外域で高い反射性能を発現させるとともに、可視光とマイクロ波帯域の電波を透過させることができる。ナノ粒子を単に膜中へ充填するのではなく、一つ一つの粒子を空間的に分離し、粒子間界面に形成される光電場と電子輸送を制御する点が特徴的である。粒子の表面構造と集合状態の設計によって、複数の光学・電氣的機能を両立できることを示す好例である。

産業技術総合研究所センシング技術研究部門の日下靖之氏には、「高精細プリンテッドエレクトロニクスに関する最近の進展」と題して執筆いただいた。機能性インクを印刷して回路や電子素子を直接形成するプリンテッドエレクトロニクスは、材料利用効率、面積化、設計変更への柔軟性に優れ、半導体後工程や先端パッケージへの応用が期待されている。本稿では、シリコンゴムがインク中の溶媒を吸収する性質を利用し、乾燥状態を制御して微細なパターンを形成する反転オフセット印刷と、その課題を克服する付着力コントラスト印刷が解説されている。半乾燥したナノ粒子層の充填状態、粒子間凝集力、シリコンゴムとの付着力および粒子層の破断挙動が、印刷の解像性と転写性を支配することが、数理モデルやシミュレーションを通じて示されている。さらに、円弧揺動型印刷装置による高精度な位置制御と、触媒インクの微細印刷と無電解めっきを組み合わせた再配線層形成への展開も紹介されている。希薄分散系から濃厚スラリー、湿潤粒子充填層、乾燥膜、焼結体へと変化する過程を粉体工学の視点で捉えることが、高精細印刷の鍵となる。

日清エンジニアリング(株)の渡邊周氏には、「熱プラズマ法を用いた次世代パワー半導体向けダイアタッチメント用銀および銅微粒子の開発」と題して執筆いただいた。次世代パワー半導体の性能を引き出すには、高い導電性と放熱性を有し、250℃程度の高温にも耐えるダイアタッチメント層が必要となる。金属ナノ粒子は、微細化によって低温で焼結しやすくなり、焼結後には金属本来の高い耐熱性を示すため、接合材料として注目されている。本稿では、約10,000℃の熱プラズマ中で原料を蒸発させ、急冷して微粒子を形成する製造法と、その反応雰囲気および粒子表面を制御する技術が解説されている。銀ナノ粒子では炭化水素膜によって粒子同士の凝集を抑え、低温焼結性を付与した事例が紹介されている。さらに、銀価格の高騰を背景に、酸化しやすい銅についても、表面有機物の付与とサブミクロン粒子の作製により、窒素雰囲気での低温焼結、導電性および体積収縮の抑制を実現する検討が示されている。粒子径、表面状態、分散性および焼結挙動の制御が、次世代接合材料の性能を左右することが理解できる。

日本鑄造(株)の大山伸幸氏および蓮見侑士氏には、「積層造形技術と材料設計からみた次世代半導体製造技術の展望」と題して執筆いただいた。半導体製造装置では、温度変化による位置ずれを抑えるために低熱膨張材料が用いられるが、近年は低熱膨張性に加え、軽量化、制振性、高熱伝導性などの複数機能が求められている。本稿では、低熱膨張合金をガスアトマイズ法によって積層造形に適した球状粉末とし、レーザー粉末床溶融結合法へ適用した研究が紹介されている。粉末特性とレーザー照射条件を最適化することで、鑄造品や鍛造品と比較して優れた熱膨張特性と機械的性質が得られることに加え、積層造形特有の急速な溶融・凝固による微細組織や転位密度が材料特性に影響する可能性が示されている。また、内部を格子構造とした軽量部材、粉粒体ダンパを内蔵した制振部材、低熱膨張合金の格子体へ銅を含浸した高熱伝導複合材料など、積層造形ならではの構造設計による機能付与も紹介されている。粉末材料の開発、造形プロセス、構造設計を一体化することにより、半導体製造装置用部材の新たな可能性が広がる。

以上、本特集では、半導体製造を支えるCMPと高精細印刷、先端パッケージやパワー半導体を支える封止・接合材料、光学機能を生み出す酸化半導体ナノ粒子、製造装置を高度化する積層造形用金属粉末を取り上げた。対象とする工程や機能は異なるものの、各技術には、粒子径と形状を整える、表面・界面を設計する、分散・充填状態を制御する、乾燥や焼結の過程を最適化するという共通の課題がある。すなわち、粉体技術は個々の材料を供給するだけでなく、材料の機能を製造プロセスと最終製品の価値へつなぐ基盤技術として位置付けられる。

半導体には今後も、さらなる高性能化と省エネルギー化、高信頼性、生産性の向上が求められる。これらを実現するには、デバイス設計や装置開発だけでなく、材料、粉体、界面、プロセスを横断した技術の融合が不可欠である。本特集が、半導体分野に携わる研究者・技術者に粉体技術の広がり伝えるとともに、粉体技術に携わる読者諸氏にとって新たな研究開発や異分野連携の契機となり、次世代半導体産業の発展につながることを期待している。