紫外線LEDと産業用LEDの応用分野で求められる熱伝導率に優れた基板

ペッカ・カティラ

LEDモジュール基板上のナノ結晶酸化アルミニウム誘電層は、産業分野における高出力光源の信頼性の高い動作を確保するために必要な、優れた熱伝導率を備える。

高出力光源を必要とする硬化やマシンビジョンといった分野において、高出力の紫外線（UV）LEDや可視光LEDの産業用市場が拡大している。産業用高出力LEDの部品や照明器具に対するアプリケーション要件としては、高いレベルの信頼性を保証しつつ手頃な価格を実現し、整備のためのダウンタイムをほとんど、あるいはまったく生じることなく、長い寿命を確保することが求められる。このような要件から、熱効率に優れるとともに、当面の動作環境に対する保護機能を備えるモジュールを開発することが必要になっている。

まずは応用分野を簡単に見てみよう。主要な用途の1つは、塗料や接着剤といった硬化性材料を乾燥させるための硬化装置である。この用途には、波長範囲が450nm未満の可視光と紫外光の両方が利用可能で、一般的には365～405nmの間のUV-A帯の波長が適用される。UV LEDと硬化の詳しい背景については、この話題を取り上げた最近の特集記事を参照してほしい（http://bit.ly/1gKflPU）。単色LEDまたは白色LEDによる高輝度照明が求められるマシンビジョン分野向けの可視スペクトルにも、同様のモジュールが利用されている。

これらの用途への適用時、LEDチップは光を放射するとともに、過剰な熱を生成する。最適な動作温度を超えた温度で使用すると、LEDチップの性能に悪影響が及ぼされ、光出力は低下し、モジュール寿命は短縮する。大まかに言って、通常の動作温度範囲内で動作する場合、温度が1℃上昇するごとにLEDのルーメン出力は0.3～0.5%低下する。

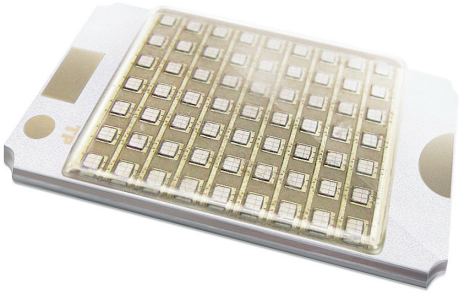

図1　ルミチップ社が提供する75Wのこの UVモジュールは、「Nanotherm」基板をベースとしている。

高い信頼性を維持しつつ、安定した均一の出力を得るには、動作温度を低下させることが必要になる。これは、最大の光出力を得るには動作温度を低下させる必要があり、また、温度を下げることが安定した色温度と優れた演色性を達成するための最大の要素だからである。適切な動作温度が維持されれば、高い効率と長い寿命というLEDチップ本来の利点が、モジュールにおいて活かされることになる。

以上から、LEDモジュール設計者の目標は、熱抵抗を最小限に抑えることによって、過剰な熱をできる限り早くチップから放散させ、最適な温度を維持することとなる。モジュールとシステムレベル部品の両方に対して適切な熱設計を行うのは、容易ではない。チップレベルの電力はますます増加しており、システムアーキテクチュアはますます複雑に進化しているためである。したがって、熱管理をさらに改善する新しい技術が必要となっている。

基板の選択肢

産業分野では一般的に、COB（chip on board）をベースとする産業用モジュールが用いられる（**図1**）。これらは、単一の大きな円形の発光面を持つCOB LEDアレイとは異なる。産業用COBモジュールは、長方形であったり、ディスクリートLEDを搭載していたりする場合がある。しかしどちらも、発光体が熱基板に搭載されるという概念は共通である。

産業用モジュールは、COBあたりの電力が数Wから100Wのものまでさまざまで、COBの面積は最大で約10cm^{2}である。このようなモジュールは、10W/cm^{2}を超える光出力密度を実現することができる。非常に大型で非常に高電力のCOBの製造を試みるのではなく、このような小さなCOBのブロックを組み合わせて、照明器具や大型の照明光源を構成することが一般的に行われる。

これらのCOBでは、20W/cm^{2}を超える高い熱放散性が求められることから、生成熱を活性層から効率的に放出することのできる基板構造が必要である。業界標準の基板は通常、メタルコアプリント回路基板（MCPCB：metal-core printed circuit board）などのメタルコ

アプラットフォームか、または、メタルクラッド基板（metal-clad PCB）としても知られるより一般的な絶縁金属基板（IMS：insulated metal substrate）である。このような種類の基板に対して、最もよく適用される材料はアルミニウムと銅である。これらの材料は、熱伝導率がそれぞれ200W/mKおよび400W/mKと非常に高い。しかし、これらの材料は導電性を持つため、絶縁誘電層が必要である。

多結晶セラミック基板材料は、低出力および中出力のモジュールに広く使用されている。アルミニウム材料と窒化アルミニウム（AlN）材料は、それぞれ20W/mKと150W/mKを超える熱伝導率を示し、最もよく使用されているセラミックスである。

誘電性セラミック基板、特にAlNは、要件の厳しい用途において魅力的な選択肢である。絶縁層を設ける必要なく、材料上に導電層を直接配置することができるためである。しかし、この材料は製造プロセスが難しく、本質的に脆弱であることから、コストが高く、それが幅広い普及の妨げになっている。

140W/mKを超える高い熱伝導率と2.5μm/mKという低い熱膨張率を持つ単結晶シリコンは、基板として魅力的な選択肢である。集積度の高いモジュールに対し、シリコンは、受動部品のモノリシック集積を可能とし、ドライバのハイブリッド集積に対して本質的に都合の良いプラットフォームである。また、青色励起の白色発光体をシリコン上に直接成長させる技術として新たに登場したGaN-on-Si（シリコン上に窒化ガリウムを結晶成長）は、モジュールレベルの基板材料としてのシリコンの魅力を一層促進するものとなっている。

以上をまとめると、さまざまな基板材料組成によって、特定用途向けのLEDモジュール設計に対する選択肢の幅が広がり、さらなる性能の最適化とコストの低減が可能になる。**表1**は、各種選択肢の比較結果をまとめたものである。

表1　一般的なCOB基板材料の比較

	アルミニウム	AlN	シリコン	MCPCB	Nanotherm
機械的強度（脆弱性）	×	×	×	✓	✓
熱伝導率（W/mK）	×	✓	✓	×	✓
金型コスト	×	×	×	✓	✓
材料コスト	✓	×	×	✓	✓

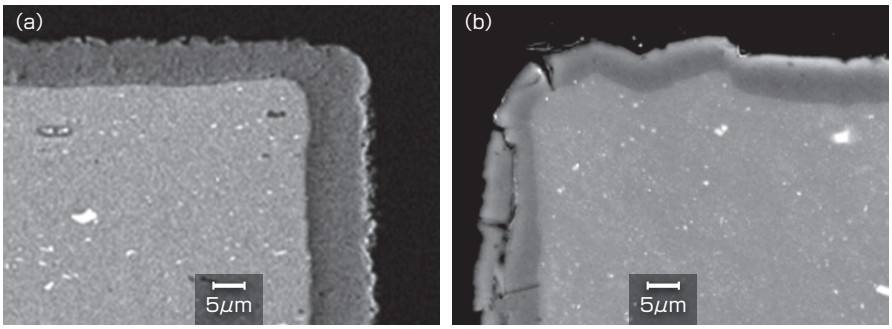

図2　SEM画像による、Nanotherm誘電層（a）とアルミニウム基板上の陽極層（b）の比較。

「Nanotherm」基板

次に、別の新しい選択肢を紹介しよう。英ケンブリッジ・ナノサーム社（Cambridge Nanotherm）が提供する「Nanotherm」は、LED用途向けの新しい基板材料である。その独特の構造によって、メタルクラッドPCB基板に対して業界で最も優れた熱性能を達成する。ナノセラミック加工によって、アルミニウム表面を最高水準の熱伝導率を有する極薄のセラミック誘電層に変える。ナノセラミック誘電層の厚さは最も薄い場合でわずか3μmとすることができ、従来の誘電体と比べて何倍も薄い。最高水準の熱伝導率と、業界最薄の誘電層という組み合わせによって、どの材料よりも低い熱抵抗値を実現する。

この誘電材料はナノ結晶酸化アルミニウム層を持つ。この層は、3～30μmの厚さにすることができる。結晶のサイズは30～60nmの間である。このサイズは、この層に高い熱伝導率、高い誘電強度（約50V/μm）、可撓性（ナノセラミックを箔基板に適用した場合に明らか）といった独特の組み合わせの性質を与える上で、重要な役割を担う。誘電層の厚さは、細かく制御して、製品のブレークダウン電圧の要件に厳密に適合させることができる。これにより、誘電層を過度に厚くして、システムの熱抵抗値を不要に増加させてしまうようなことがなくなる。Nanotherm基板は最大で152W/mKという、AlNに匹敵する熱伝導率を備える。

図2aおよび**2b**は、スルーホール（ビア）を持つアルミニウム基板上に蒸着させたナノセラミック層と陽極層を、走査型電子顕微鏡（SEM：scanning electron microscope）で撮影した画像である。断面図は、各基板のスルーホールの入口部分のものである。この画像からは、Nanotherm層と陽極層で、密度の均質性に著しい違いがあることがはっきりと見てとれる。陽極層には、複数の亀裂や剥離が見られる。

表2　UV LEDモジュールの特性

サンプル	総電力P_tot（W）	光電力P_opt（W）	効率（%）	熱電力P_therm（W）	チップ温度（℃	総熱抵抗Rth_total（K/W）	光出力密度（W/cm²）
1	74.8	25.4	34.0	49.4	54.6	0.60	7.5
2	74.8	25.3	33.9	49.4	52.9	0.56	7.5
3	74.8	25.6	34.2	49.2	53.6	0.58	7.5
4	74.8	25.4	34.0	49.3	55.7	0.62	7.5

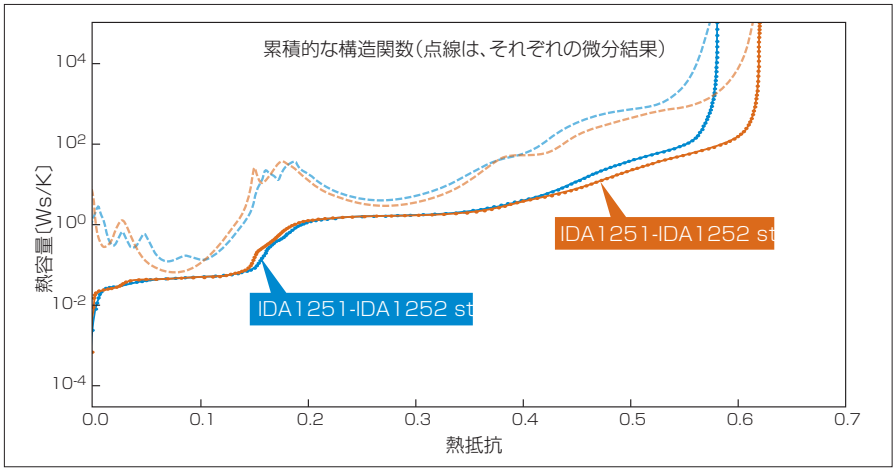

図3　米メンター・グラフィックス社（Mentor Graphics）の「T3Ster」システムによる結果には、熱抵抗の低い75WのLEDモジュールの典型的な構造関数が示されている。

高密度で均質なセラミック層をアルミニウム表面上に生成できるという点においてNanotherm材料は他の手法とは一線を画している。これによって、電子部品に求められる、信頼性の高い誘電特性が実現される。

高出力UV COBの設計

フィンランドのルミチップ社（Lumichip）は、Nanotherm基板を利用して、高出力UV COBをベースとするLEDモジュールを製造し、その卓越した性能を実証した。このモジュール構造には、次のような特長がある。

- 最適な熱特性を実現しつつ、ブレークダウン電圧の大きさが必要最小限となるように、誘電層の厚さが最適化されている。
- 導電配線は、めっき銅で形成されている。
- 反射率を高めることを目的に、レイアウトが最適化されている。
- 標準の商用基板が、標準の産業プロセスとともに使用されている。
- ダイ接着プロセスには、銀充填接着剤の代わりにフィンランドのインクロン社（Inkron）によるナノ銀材料が利用されている。銀焼結手法は、高出力LED用の新たな標準的手法として台頭しつつある。ここでは、半導体チップの劣化を回避するために、焼結温度200℃の無圧力プロセスを適用した。
- シリコーン製グロブトップ（glob top）構造によるワイヤボンディングと機械的な保護が、一般的な材料によって実現されている。

図1に示したCOBは、LEDアレイを搭載する連結可能な75Wのモジュールで、7×9の行列状に並んだ合計63個のチップで構成されている。基板の厚さは1mmで、エッジをレーザで切断することで高い寸法精度を達成し、モジュールを組み合わせて任意の長さのライン光源を構成できるようになっている。総放熱量は約50W、放熱密度は20W/cm²である。このような優れた熱特性を備えつつ、光出力は25Wを超えており、34%という卓越した効率を達成している。

表2は、このモジュールの特性をまとめたものである。75WのこのLEDモジュールは、35%に近い高い効率を実現する。総光出力は385nmで20Wを超える。モジュール温度の均一性は非常に高く、エッジと中央の温度差は17℃未満となっている。

ナノ銀材料は、「T3Ster」のテストグラフが示すように優れた熱性能を備える（**図3**）。熱抵抗グラフの最初のステップ（平坦部分）は、ダイとダイ接着複合物の熱抵抗を示している。ダイとボンド線を合わせた熱インピーダンスは、平均で0.18K/W未満である。

Nanothermのようなアルミニウムセラミック複合材料は、高出力LEDモジュールに適した費用対効果の高い基板材料であり、優れた機械的特性と熱特性を備えている。ルミチップ社は最近、365～405nmのUV-A波長を対象とする、Nanothermプラットフォームに基づく高出力LED COBモジュールのフルシリーズを提供開始した。

著者紹介
ペッカ・カティラ（PEKKA KATILA）は、フィンランドのルミチップ社（Lumichip：lumichip.com）の集積モジュール担当ディレクター。

LEDJ