



# LED 熱管理—性能の予測と測定

ジャイルズ・ハンプストン

本稿では、LEDによって生成される廃熱を管理して分析するための高度な材料とテスト装置を紹介する。これにより、さまざまな照明にわたって性能を改善することができる。

LEDを毎日のように使用していると、LEDとそれに近い固体レーザーが実はかなり驚くべき存在であることを簡単に忘れてしまう。考えてみてほしい。この小さなデバイスを電池に接続するだけで光が生成される。しかも光の種類は1つだけではない。使用可能な波長は、遠紫外(far UV:far ultraviolet)領域から深赤外(deep IR:deep infrared)領域にまでわたり、当然ながら人間の可視領域もこれに含まれる。加えて、光源のサイズや電力定格は途方に暮れるほど多種多様に取り揃えられている。LEDの応用分野は日々拡大している。LED採用TVリモコンからは、LED TVが誕生した。LED採用トーチライトは、LED車載ヘッドライトや、今ではスポーツスタジアム用の投光照明にまでその姿を進化させている。ポリマー硬化、浄水、園芸に用いられる新しい産業用製品は、驚異的な進歩を遂げている。しかし、これらの無数の応用分野には、信頼性の高い動作を妨げる共通の障害が立ちはだかっている。つまり、適切な熱管理の問題である。本稿では、固体照明(SSL:Solid State Lighting)製品の開発者が、システム設計を適切に冷却するために必要な基礎知識を示したいと思う。

現在、LEDが最も普及している応用分野はおそらく、一般照明である。ご存じのとおり、LED照明は現在提供されている他のどの光源よりも効率的に高品質な光を生成することができる。

実際、従来の非効率なタングステン電球の販売がますます多くの西欧諸国で禁止されている背景にある理由の1つがそこにある。簡単に制御可能で、光源を新しい魅力的な形状で製造できることをそれに加味すれば、パッケージLEDの市場規模が2019年までに221億ドルに達すると米ストラテジー・アンリミテッド社(Strategies Unlimited)が予測する理由も一目瞭然といえる(<http://bit.ly/1FQd6mh>)。

## LEDは、ますます高温に

最新の高品質な高輝度LED(HB LED)の効率は約45%である。特に素晴らしいようには思えないかもしれないが、タングステン電球の効率が5%未満であることと比べれば、LEDが飛躍的な改善であることがわかる。効率は、発

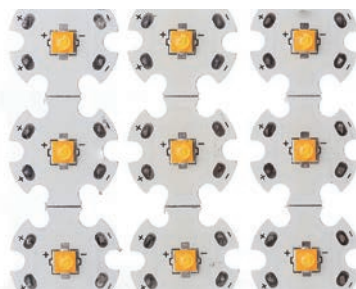


図1 HB LEDのパッケージダイは、MCPCB「スター基板」にはんだ付けできる。基板はデバイスに対して大きすぎるように見えるかもしれないが、熱が基板とヒートシンクの間で比較的無制御の界面抵抗に到達するよりも前に、熱を拡散させるためにその大きさが必要である。より大きな面積へと熱を拡散させることによって、界面抵抗がかなり高い場合でも、LEDとヒートシンクの間で経路の熱インピーダンスを低く抑えることができる。

光効率、つまり1ワットあたりのルーメン数(lm/W)で表すこともできる。量産されているHB LEDは、150lm/Wを軽々と達成しており、業界では2020年までに200lm/Wに達すると見込まれている。研究開発段階のデバイスで300lm/Wを上回るものが存在するため、この目標はおそらく達成されるだろう。

LEDの問題は、光子に変換されない電気エネルギーが熱に変換されることである。簡単に説明すると、次のとおりだ。動作中のLEDは高温になる。熱とLEDは非常に相性が悪い。熱はLEDの効率を引き下げ、生成される光量を低下させる。この影響が増大すると、突発故障につながる。ある程度の熱には耐えることができるが、100°Cを大きく上回る温度でこの半導体を動作させると、生成される光の品質が低下し、LED電球の寿命の大幅な短縮につながるさまざまな摩耗機構が引き起こされる。

LEDの動作温度は、周辺温度に比較的近い温度にする必要があるため、熱を除去するための唯一の有効な手段は熱伝導である。このことからHB LEDは、伝導によって熱をヒートシンクに移すように特別に設計された回路基板に接着する必要がある(<http://bit.ly/2ducZpC>)。さまざまな種類の回路基板が、絶縁金属基板(IMS:Insulated Metal Substrate)、メタルコアまたはメタルクラッドプリント回路基板(MCPCB: Metal Core or Clad Printed Circuit Board)、メタルインボードプリント回路基板(MIB PCB: Metal-In-Board Printed Circuit Board)などの名称で知られている。

## 熱性能の測定基準

LED照明製品を製造するメーカーは、選定済みのHB LEDに適した熱伝導性の回路基板を選択する必要がある。これは、さまざまなMCPCBメーカーが提供するデータシートに目を通して、価格と照らし合わせて十分な熱性能を備えるものを選択するという単純な作業のはずである。しかし、これを行うには熱性能に対して用意されている測定基準を理解する必要がある。それを理解していなければ、判断を誤る可能性は高い。

例えば、熱伝導率を考えてみよう。熱をよく伝える物質は、銅の394W/mk(ワット毎メートル毎ケルビン)のように熱伝導率が高く、熱を伝えにくい物質は、アルミナ(酸化アルミニウム)の25W/mKのように熱伝導率が低い。この測定基準で考えると、銅コアを採用する回路基板はアルミナコアを採用するものよりもLEDの温度をかなり低く維持することができようと思われる。しかしこの結論は、必ずしも正しくない。熱伝導率は1つの次元に正規化されるため、コアの面積と厚さを指定しなければ比較は不可能である。別の言い方をすれば、厚さ1.5mmのアルミナ基板は、面積が同じで厚さが25mmの銅基板よりも熱伝導性が高くなる。

熱抵抗は、熱伝導によってLEDから熱を除去する回路基板の熱性能を比較するための測定基準として格段に有効である。熱抵抗は、厚さを熱伝導率で割ることによって得られる。上述の例の銅基板の熱抵抗は $0.063^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ であるのに対し、アルミナ基板の熱抵抗は $0.060^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ とそれよりも低い。

## 熱抵抗

熱抵抗の素晴らしい点は、HB LED用の熱伝導性回路基板のような、複雑

|              | 熱抵抗 = 厚さ / 熱伝導率<br>( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ ) ( $\mu\text{m}$ ) (W/mK) |    |      |
|--------------|---|----|------|
| FR4          | 2.40  | 60 | 0.25 |
| ポリイミド        | 0.21  | 17 | 0.80 |
| エポキシ充填材      | 0.13  | 38 | 3.0  |
| Nanotherm LC | 0.01  | 10 | 7.3  |

図2 一般的に使用される4つの異なる誘電材料は、それぞれ大きく異なる熱特性を示す。

な構造の各層の分析に使用できることである(図1)。上から順に見ていくと、最初の層は、1、2、または3オンス(約28g、57g、85g、厚さは35、70、105 $\mu\text{m}$ )の銅トラッキングになる。ほとんどの場合、HB LEDは銅トラッキングにはんだ付けされる。銅の下は誘電体となる。一般的には厚さ約75 $\mu\text{m}$ の熱伝導性エポキシだが、熱抵抗を特に低くする必要のある設計を対象に、ナノ材料をベースとするより高度な解決策が提供されている(<http://bit.ly/2d9WjbH>)。

図2は、MCPCBによく使用されるいくつかの誘電材料の熱抵抗特性を比較したものである。熱伝導率は、材料を評価するための情報にはならない。最小の厚さは、製造可能性、信頼性、誘電体の耐久電位といった複数の項目に依存する。

誘電体はメタルコアによって支えられる。銅は熱特性には優れているものの、コスト、重さ、膨張率がヒートシンクと一致する(ヒートシンクにはほぼ確実にアルミニウムが用いられる)という理由で、大抵はアルミニウムに軍配が上がる。ヒートシンクとMCPCBの間には通常、TIM(Thermal Interface Material)が挿入される。MCPCBとヒートシンクが完全に平らということとはほぼあり得ないためである。TIMは物理的に柔軟な材料で、変形して接合部の隙間を確実に埋めることができる。薄い空気層であっても、熱伝導率

が非常に低い(0.024W/mK)のために、熱抵抗はかなり高くなるので、TIMが必要である。図3に、LED構造における一般的な材料階層を示す。

HB LEDとヒートシンクの間を総熱抵抗の計算は、きわめて単純明快である。ただ個々の層の熱抵抗を加えるだけで算出できる。これは、熱伝導率を比較基準として使用することの最大のメリットだが、HB LEDの動作温度を予測したい場合、そして特に熱経路が複雑な場合は、熱インピーダンスという別の熱単位が必要になる。

## 熱インピーダンス

熱インピーダンスとは、規定部品の熱抵抗のことである。つまり、直列と並列のすべての熱経路を加算することによって、熱経路全体をモデル化することができる。例えば、MCPCBのデータシートに熱抵抗が $1.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ と記載されているとする。面積の単位に注意してほしい。これはすなわち、MCPCBの面積が $4\text{cm}^2$ であるとする、熱インピーダンスは $0.25^{\circ}\text{C}/\text{W}$ になることを意味する。MCPCBがヒートシンクにボルトで固定されていて、ボルトによってMCPCBに平行な熱経路が生成されている場合は、それがLEDの冷却に貢献する。ボルトが3つあり、それぞれ熱インピーダンスが $5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ならば、基板とボルトを合わせた熱インピーダンスは、 $R_{\text{total}}=1/(1/r_1+1/r_2+\dots+1/r_n)$ から $0.21^{\circ}\text{C}/\text{W}$ と計算される。

ヒートシンクは、定格熱インピーダンス( $0.7^{\circ}\text{C}/\text{W}$ など)が規定された部品として販売されている。つまり、LEDの動作温度を計算するための十分な情報を得ることができる。100WのLEDを例にとると、効率が低いために55Wの熱が放出される。MCPCB、ボルト、ヒートシンクを経由するLEDか

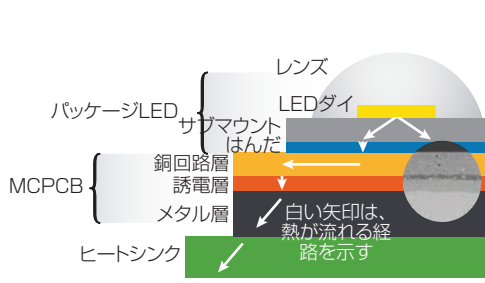


図3 この図には、LEDダイからヒートシンクまでの熱経路が詳しく示されている。LEDダイは点光源に近似される。熱伝導率の高い層を熱抵抗の高い層に重ねると、熱は横方向に拡散する。LEDからヒートシンクまでの熱インピーダンスを低くするには、熱抵抗の高い層に到達する前に熱を拡散することが重要である。挿絵は、誘電層を非常に薄くすることの重要性を示す商用MCPCBである。

ら大気中までの熱経路は、 $0.21+0.7=0.91$  °C/Wである。55Wの場合、これらの構成要素による温度上昇は50°C ( $0.91 \times 50=50$ )となる。周辺温度が25°Cの場合、HB LEDは、(かなり大まかな概算だが)75°Cで動作することになる。

### 近似、モデル、界面抵抗

熱は必ず高温部から低温部へと流れる。HB LEDは、一般的に約1mm<sup>2</sup>と物理的に小さなデバイスであるのに対し、MCPCBはそれよりもかなり大きい。つまり熱は、構造内を垂直方向に流れるだけでなく、一部は周辺に向かって横方向に伝達する。伝熱の観点からは、LEDの下に大きく分厚い銅パッドを配置するのが良いように思われる。しかしここでも、状況はそれほど単純なものではない。冷却要件が非常に高いLEDデバイスに対し、合計等価熱伝導率が100W/mK近くにも達する最高クラスのMCPCBが提供されている(ただし、寸法が規定されていないデータシート値である)。

構造にはまず、アルミニウムプレートが含まれる。プレートの片面は、ナノ粒子アルミナに変換することによって絶縁性を持たせている。ナノ粒子アルミナは非常に優れた誘電体(50V/μm以上)で、層を非常に薄くすることができるため、熱抵抗は非常に低い。銅トラックがその上に接着される。グルーライン(接着剤塗布ライン)は非常に細く、充填材を含まない接着剤の熱伝導

率は低いので(一般的に0.2W/mK)、熱障壁がダイのすぐ下に存在することになる。熱を拡散しない場合、熱抵抗は恐ろしいことになる。しかし銅パッドの寸法を少し大きくするだけで、LEDからの熱は大きな面積へと拡散され、それによって熱インピーダンスは著しく低下する。図4は、銅パッド面積と熱インピーダンスの関係を表すグラフの例である。

複数層と並列経路からなる構造において、HB LEDの動作温度を正確に予測する唯一の方法は、有限要素モデルを構築することである(<http://bit.ly/2dub6sW>)。有限要素モデルは、システムの熱性能の把握に大いに役立つが、その結果の精度は、2つの要因によって著しく損なわれる。その要因とは、界面抵抗とMCPCBの性能測定値である。

界面抵抗(正確な専門用語を使うならば、界面熱抵抗)は、2つの材料が隣接する部分で発生する。完璧に接合された境界であっても界面抵抗は存在する。物理学の原理に基づき、高温部

から低温部流れようとする熱の割合は、境界で散乱されて不要な方向に分散される。モデルの観点からは、界面抵抗は関連する熱抵抗と併せて追加の層とみなすことができる。実際値は、制御が困難な数多くの変数の影響を受けるので、どれだけの値を割り当てればよいかの判断は難しい。また、界面抵抗は通常は一定ではなく、隣接面の材料属性、形状、マクロ近接度のわずかな変化によって経時とともに変わるため、問題はさらに複雑になる。

同様に、MCPCBの熱抵抗の測定も一筋縄ではいかない。MCPCBは、多数の内部境界を含む複雑な多層構造となっている。MCPCBの熱抵抗を測定するための一般的な方法としては、軸流法やレーザフラッシュ法がある。

### MCPCBの熱特性の測定

軸流法では、MCPCBを高温プレートと低温プレートで挟む。サンプル全体にわたる温度差を維持するために必要な電力を記録することにより、熱インピーダンス、熱抵抗、熱伝導率を得ることができる。レーザフラッシュ法による熱拡散率の測定では、レーザによって短パルスの熱をサンプル前面に当て、IRカメラによって背面の温度変化を時間の関数として観測する。続いて計算を施すことによって熱特性を明らかにすることができる。

どちらの方法も均質な材料には有効

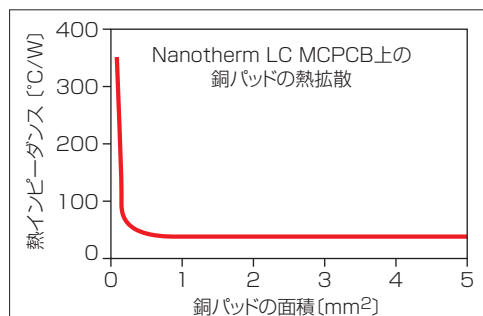


図4 はんだ付けされたLEDダイ(各辺250μm)から、Nanotherm LC MCPCB(1.5mmのアルミニウム、20μmのナノ粒子アルミナ)上の銅パッドまでの間の熱抵抗計算値を、銅パッド面積の関数として示したグラフ。有限要素モデルには、内部界面抵抗の見積もり値が含まれる。銅とナノ粒子アルミナ誘電体の間の薄い接着結合部によって熱障壁が生成されるため、銅パッド内の熱拡散は、熱インピーダンスを低くするために不可欠である。

だが、熱伝導率が2ケタも異なる複数の層で構成される多層構造に適用する場合には、両者の結果はまず一致しない。一般的にMCPCBに適用する場合、レーザーフラッシュ法の方が熱抵抗が低めに測定されることが知られている。したがって、メーカーがデータシートに値を記載するための方法としてどちらを好むかは、言うまでもない。

HB LEDの冷却に用いられるMCPCBの熱性能を確認するには、実際に動作するデバイスを使用して測定するのが望ましい。LEDなどの半導体の順方向電圧降下は、非常に正確で再現可能な特性である。窒化ガリウム(GaN)ベースのLEDの場合、ダイオード接合部の温度係数は、半導体の正確な種類にもよるが、 $-3 \sim -6 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ である。既知の温度での順方向電圧降下を測定すれば、逆算が可能となり、他の条件下の順方向電圧降下からデバイス温度を導くことができる。

HB LEDはMCPCBに接着され、MCPCBは温度制御されたヒートシンクに固定される。HB LEDに電源を投入し、(非常に具体的な条件下での) *p-n* 接合の順方向電圧降下の測定値から接合部温度を算出する。これにより、熱拡散や界面抵抗の実際の影響を含むヒートシンクまでの熱インピーダンスが求められる。さらに素晴らしいことに、LEDにパルスを印加して、やや高度な計測器と計算を適用することにより、LED接合部とヒートシンクの間合計熱インピーダンスに寄与する個々の構成要素と境界の内訳まで明らかにすることができる。このデータをグラフで表現したものは、俗に「累積構造関数」と呼ばれる。この目的用に特別に設計された商用装置が提供されるようになって、このテスト手法の複雑さはかなり緩和されている。



図5 ファンによって補助されたヒートシンク上に配置された150WのLED光源が、積分球の中に吊り下げられている。この測定装置により、総光出力を波長の関数として測定することができる。写真は、光源と照明器具の試験のみを専門とする正式認可試験施設であるThe Lighting Industry Association Laboratoryの設備で撮影されたものである。

## ルーメン出力

どれだけ高度な熱モデルや測定システムを使用するかにかかわらず、HB LEDが安全な温度で動作している場合に、実際に重要なのはルーメン出力である。より具体的には、対象波長における明るさである。生成されるすべてのIR光子を含めると、タングステンフィラメント電球の効率は実はかなり高い(90%以上)。

照明器具とLEDモジュールからの総光出力の測定には、積分球が用いられる(図5)。積分球の内壁は反射率の高い塗料でコーティングされており、光源からの光を方向や波長に関係なくすべて集めることができる。光源からの光が円錐などのパターンに封じ込められている場合は、代わりにゴニオフォトメータが用いられることが多い。ゴニオフォトメータは基本的に、光量の角度依存性を測定する測光器である。最新の測光器では通常、光度分布

に加えて、光束、空間色分布、輝度といった光源に関する光学情報も得ることができる。HB LEDに対する電気入力把握して、波長範囲、ビーム角、色相を規定すれば、光源の電気光変換効率を定量化することができる。

## 結論

LEDは、光を生成するように設計された半導体デバイスである。しかし、効率はそこそこで、その過程でかなりの量の排熱が生成される。この熱を伝導によって除去する必要がある。そうしなければLEDの性能が損なわれ、最終的には寿命が短縮する。この課題を解決するために、厚さ方向の熱伝導率が非常に高い特殊な回路基板が開発されている。適切な熱単位を使用するように注意すれば、簡単な計算によって、特定の熱管理対策の性能を見積もることができる。

有限要素法を用いることにより、熱性能に対する適度に正確なモデルを構築することができる。ただし、境界に対して信頼性の高い値を使用しなければ、その精度は損なわれる恐れがある。MCPCBのような複数の構成要素からなる構造の熱特性の測定は複雑で、得られる値は適用する手法によって異なる可能性がある。動作中のLEDとヒートシンクの間合計熱インピーダンスに寄与する、すべての構成要素の詳細な内訳を明らかにできる高度なテスト装置が存在する。LED光源の電気光変換効率を明らかにするには、電気入力、ダイ温度、波長範囲、ビーム角度、色相など、複数のパラメータの仕様が必要である。

## 著者紹介

ジャイルズ・ハンブストン(GILES HUMPSTON)は、英ケンブリッジ・ナノサーム社(Cambridge Nanotherm)のアプリケーション・マネージャー。URL:camnano.com