

の性能を評価している。普遍性のある結果を得るため、図4に示す実験装置(発熱体+アルミナ平板もしくはCu平板)を用いて、室温(20~25℃)の無風に近い状態(0.05m/秒以下)の石英ケース内で実験した。ここでは、密着した発熱体とアルミナ平板の熱特性を調べるために、熱伝導率の低いニードルで両者を密着させ、熱的に孤立させた。温度は発熱体の表面温度を測定した。

まずは、LED素子に見立てた平板発熱体(抵抗加熱ヒーター)を、ほぼ熱的に孤立した同じ寸法(20mm×40mm×2mm)のアルミナ平板(N-9H)とCu平板に固定し、それぞれ3Wの電力を長時間印加した場合の温度を測定した。

平板を置かずにヒーターを作動した場合では、表面温度は室温から97℃まで急激に増加し、以後一定となった(図5)。ヒーターにCu平板を固定した場合も同様の傾向が見られ、88℃に達した。これに対してアルミナ平板を用いた場合は、温度は最高でも66℃と低い値だった。以上の結果から、温度上昇は熱放射率の大きさに依存していることが分かる。従って、無風、室温の条件下で、効率の良い冷却効果を得るには高い熱放射率を有するアルミナが望ましいといえる。

次に、複数の異なる面積のアルミナ平板、またはCu平板において、表面温度が常に80℃になるように発熱

図5 30℃以上の冷却の差が生じる
アルミナ(N-9H)と金属(Cu)を用いたヒートシンクと、何もヒートシンクを用いないという三つの条件でヒーターを加熱した。その結果、アルミナを用いたものが最も冷却性能を持つことを示した。

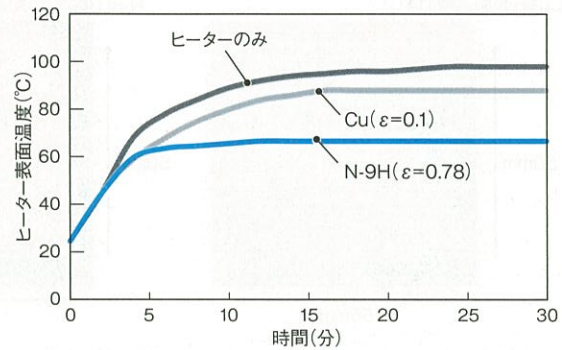
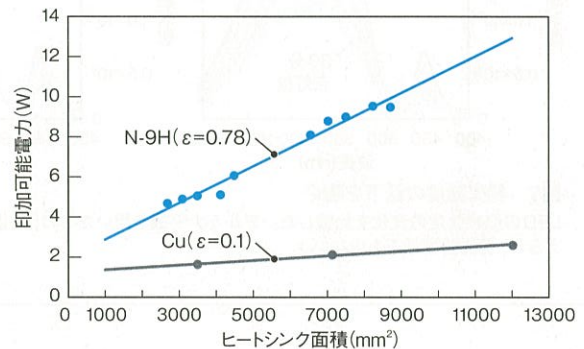
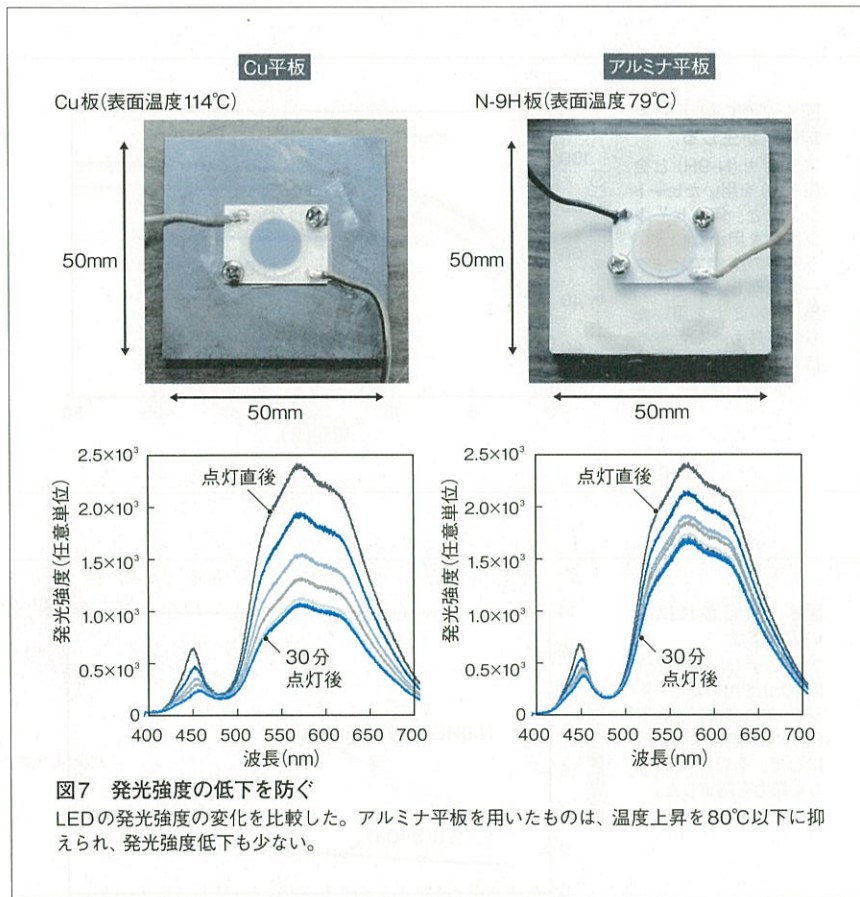


図6 加熱されにくいアルミナ
アルミナ(N-9H)と金属(Cu)を用いたヒートシンクの表面温度を80℃で一定になるようにして、その際に印加した電力を測定した。



体の温度を調整し、印加可能な電力と面積の関係について調べた。結果を図6に示す。この図では面積の異なる正方形のアルミナ平板およびCu平板に印加できる電力の最大値をプロットしている。アルミナ平板はCu板に比べて冷却効果が高いことが確認できる。

さらに、印加可能な電力はアルミナ平板、Cu平板ともに面積に対してほぼ正比例であることから、式(1)に記したStephan-Boltzmannの式に関係と整合性が取れる。つまり、アル



ミナのように熱放射率が高いものほど、同じ面積で多くの熱を放射できるわけだ。

これらの放射冷却効果を得たことから、次に市販の高輝度白色LED素子の冷却について実験した。同じ寸法の平板状(50mm×50mm×5mm)のアルミナ平板とCu平板に、出力8Wの高輝度白色LED(シチズン電子製の「CL-L230-C10L-A」)を固定し、発光強度の変化とLED素子の温度を比較した(図7)。

図から分かるように、Cu平板においては、点灯時間が30分程度でLED素子の表面温度が100°Cを超え、発

光強度が著しく低下している。この発光の減衰は、温度上昇による「ドロープ現象[†]」の影響と考えられる。一方のアルミナ平板においては、同等の時間で表面温度は79°Cであり、それ以降は温度上昇しなかった。発光強度の低下も、Cu平板に比べて少なかった。

従って、LED照明を設置するような無風条件下では、熱放射率の高いアルミナ平板は、金属であるCu平板に比べて冷却能力が高いことが実証された。

実際の機器に搭載するためには、性能だけでなくコストの議論も欠か

せない。我々は、LED照明向けのヒートシンクでは、照明器具メーカーに対して大型器や小型器でほぼ共通のセラミック基板を提供している。

セラミック基板は、金属基板やプリント基板などに比べればコストは確かに高い。だが、セラミック基板を共通化することで量産効果が高まれば、コスト上昇をある程度抑えることができる。現状では大量生産には至っていないが、2年以内には十分な量産規模を確保できると考えている。

製品ラインアップを絞る

既に製品として用意している例としては、横60mm×縦30mmの長方形、厚さ6mm程度のセラミック基板がある。セラミック基板の上にマルチチップ・タイプのLEDモジュールをネジ止めして使う。これは十数Wを投入できる高出力LEDモジュールにまで対応できる。大型器はLEDモジュールをネジ止めしたセラミック基板を複数個、小型器は1個使うといった形を採る。

LEDに次ぐ市場として我々が期待しているのが、パワー半導体の分野である(次ページの「TSVと組み合わせる放熱」参照)。“放射”による冷却は、おおむね発熱体の表面温度の4乗に比例して良くなる。このため、高温駆動が前提となるパワー半導体に関しては、わずかな物性改善でも冷却特性の向上が期待できる。

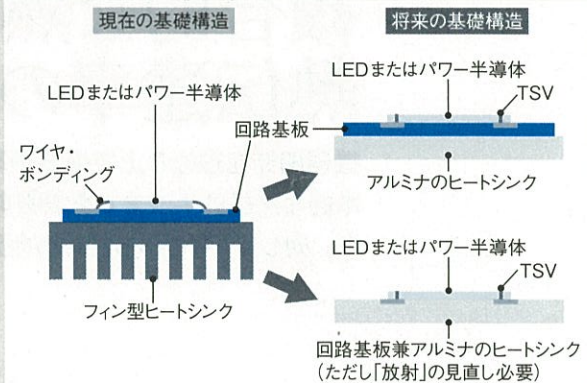
特に、SiC(炭化ケイ素)やGaN(窒

TSVと組み合わせて放熱

今後のLED照明やパワー半導体の開発状況についてメーカーや調査会社の報告を調べると、高集積・小型化が積極的に進められている^{9)・10)}。その有力な手段の一つとして、Si貫通ビア(TSV)が取り上げられている^{9)・11)}。TSVを用いた構造は高集積・小型化に寄与するだけでなく、ワイヤ・ボンディングを配線に利用した既存構造に比べて、素子と基板間の熱移動を良好にする効果があることが分かってきた。この特性を利用してダミーのTSVを設ける試みもある¹²⁾。このような技術の流れから、ヒートシンクの果たす役割も変化していくだろう。

我々ではこの技術変化を以下のように捉えている。一般にLEDやパワー半導体を搭載するモジュールは、これらの素子駆動で発生した熱を、回路基板を介し、その先に設けたヒートシンクから放熱する。アルミナは放熱性能に優れる上、高い絶縁性を有する。このため、回路基板兼ヒートシンクの役割を担う材料として使われる可能性がある(図B-1)。例えば、TSVを適用したLED素子では、配線の施された回路基板兼ヒートシンクにLED素子を直接はんだ付けすることも予想される。

パワー半導体では、既にAlN(窒化アルミニウム)などのセラ



図B-1 適用範囲が広がる

フィン型のヒートシンクを用いているLEDやパワー半導体は、TSVを組み合わせてアルミナのヒートシンクを活用する可能性がある。

ミックスの回路基板を利用していることが知られているが、熱放射率はもとよりコストや生産性を含めてもアルミナに競争力があると考えている。AlNはアルミナの数倍の価格で、ある条件下における我々の実験ではヒートシンク用のアルミナで同等以上の放熱特性を確認済みである。

化ガリウム)など、これまで以上に高温で駆動する素子が増えることが予想されており、放射を利用するヒートシンクが活躍する機会は増えていくと考えている。我々は現在、N-9H以

上に放熱性に優れるアルミナを開発中だ⁸⁾。アルミナの純度や組成、粒径などを最適化して性能を高めており、パワー半導体に向く製品として今後提案していく計画である。 ■

参考文献

- 1) Narukawa, Y. et al., "Improvement of Luminous Efficiency in White Light Emitting Diodes by Reducing a Forward-Bias Voltage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.46, pp.963-965, 2007.
- 2) Taguchi, T. and Kono, M., "A Novel White LED Lighting System for Appreciation of Japanese Antique Ink Painting," *J. Light & Vis. Env.*, Vol. 31, No.3, pp.149-151, 2007.
- 3) Mukai, T. et al., "Characteristics of InGaN-based UV/blue/green/amber/red light-emitting diodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38, pp.3976-3981, 1999.
- 4) Karames, M. et al., "Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting," *J. Disp Technol.* 3, pp.160-175, 2007.
- 5) Nakamura, S., "GaN-based Solid State Lighting," *The International conference on electronics packaging 2010*, Keynote Speech 1
- 6) LED照明推進協議会, JLEDS Technical Report, Vol.2, 2008年4月.
- 7) Dewitt, D. P. et al., "Theory and Practice of Radiation Thermometry," A Wiley Inter Science Publication, pp.43-44, 1988.
- 8) 三浦ほか, 「熱放射を利用した高放射率アルミナセラミックス平板ヒートシンクによる冷却効果」, 『第26回エレクトロニクス実装学会春季講演大会』, 平成24年3月7日~9日.
- 9) Yole Developpement, "2.5 interposer, 3DIC and TSV Interconnects: Applications, market trends and supply chain evolutions," *European 3DTSV Summit*, Grenoble (France), January 22-23, 2013.
- 10) 堀尾ほか, 「SiC パワーモジュールのパッケージ技術」, 『富士時報』, Vol.84, No.5, 2011.
- 11) Lv, Z. et al., "Study on packaging method using silicon substrate with cavity and TSV for light emitting diodes," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology 3 (7)*, pp.1123-1129, 2013.
- 12) Chung Yu Wang(発明者), Taiwan Semiconductor Manufacturing Company, Ltd. (出願者), "LED flip-chip package structure with dummy bumps," 米国特許, 特許番号: 8,183,579 B2.

↑ドループ現象=チップに大電力を投入するとLEDの発光効率が低下する現象。LEDメーカー各社は、単位光束当たりのコスト削減に寄与するため、ドループ現象の抑制に注力している。