



ヒートシンク製品の歴史と今後の展開

History and Future Development of Heatsink Products

勝谷 洋*
Hiroshi Katsutani

山形 伸一
Shinichi Yamagata

中村 泉
Izumi Nakamura

半導体からの効率的な放熱と熱ストレス低減を担う半導体放熱用基板（以下ヒートシンク）は、旧東京タングステン(株)（以下東タン）と住友電工の基盤技術であるタングステン（W）、モリブデン（Mo）系材料を中心に量的に拡大を続けてきた。ヒートシンクの歴史を、適用製品であるパソコン用マイクロプロセッサ、ハイブリッド自動車用IGBT、携帯基地局用高周波デバイスの変遷とともに概観する。さらにダイヤモンドやセラミックを含む新材料の展開についても紹介する。

Heatsinks, the heat radiation base plates of semiconductor devices, are designed for efficient heat dissipation and heat stress reduction from semiconductors. The number of heatsinks made from tungsten- and molybdenum-based materials using a technology developed by Tokyo Tungsten Co., Ltd.* and Sumitomo Electric Industries, Ltd. has been increasing. This paper introduces the history of heatsinks, including the changes in the microprocessors of personal computers, insulated-gate bipolar transistor modules inside hybrid vehicles, and high frequency devices for cellular phone base stations. The development of new materials, such as diamond and ceramics, is also covered.

* Tokyo Tungsten Co., Ltd.: Merged with Osaka Diamond Industrial Co., Ltd. to form A.L.M.T. Corp., a Sumitomo Electric Group company

キーワード：半導体放熱基板、熱伝導率、熱膨張係数、半田接合、複合材

1. 緒 言

1960年代、シリコン（Si）半導体素子の高出力化、高密度化によって発生する熱と熱膨張率の不整合により素子とベース板との接合層（半田やロー材）に亀裂が生じ、著しい場合には素子割れに至る事態が発生した。半導体メーカーは、この課題解決を従来のベース板材の銅（Cu）、アルミニウム（Al）、以外の材質選択に求めた。後にベース板はヒートシンク

クと称されることになる。ヒートシンクとして要求される特性は、①熱伝導率（Thermal Conductivity、以下T.C.と略す）、②熱膨張係数（Coefficient of Thermal Expansion、以下C.T.E.と略す）、③素子と半田（またはロー材）との接合性等であり、これらを満たす材料として東タンと住友電工の基盤技術であるW、Moを用いた材料が着目されることになる（図1、表1）。

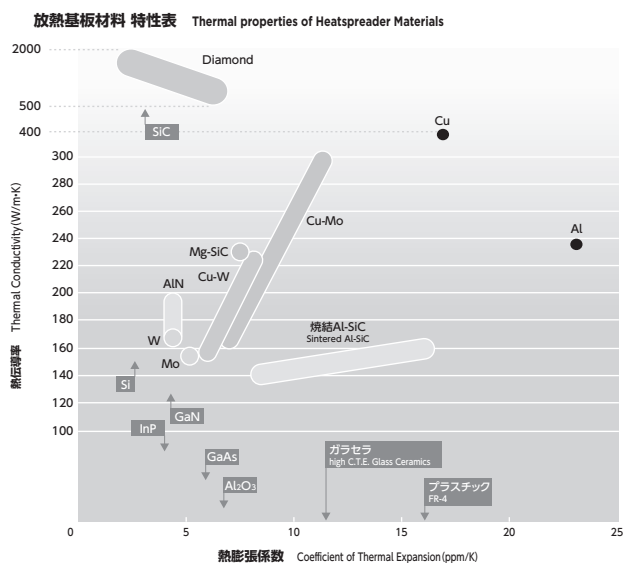


図1 ヒートシンク基板材料 特性表

表1 ヒートシンク材料の特性一覧表

系統	材質	名称	組成	熱膨張係数 [ppm/K] at 25°C	熱伝導率 [W/(m·K)] at 25°C	比重	
ヒートシンク	金属	W		4.5	167	19.3	
		Mo		5.1	159	10.2	
	複合金属	Cu-W	W-10	89W-11Cu	6.5	180	17
			PCM35	65Mo-35Cu	7.7	210	9.7
		Cu-Mo	CPC141	Cu/PCM/Cu	8.5	220	9.5
			セラムックス		AIN	SALN-20	4.5
	セラムックス-金属複合	Al-Si	A-40	60Al-40Si	13	126	2.53
		Al-SiC	β 8	70SiC-30Al	8	140	2.6
	ダイヤモンド	Mg-SiC	MgSiC	18Mg-SiC	7.5	230	2.7
		Cu-Dia	DC60	Dia-Cu	6	550	5
スミクリスタル*			2.3	2000	3.52		
		CVDダイヤモンド		2.3	1000	3.52	
参考データ	半導体	Si		3	151	2.3	
		GaAs		5.9	46	5.32	
		InP		4.5	70	4.79	
		GaN		5.6	130	6.15	
		SiC		3.1	490	3.2	
	セラミックス	Al2O3		6.7	17	3.6	
		Cu		17	393	8.93	
	金属	Al		23	238	2.7	
		コパール		5.3	17	8.36	
		プラスチック FR-4		16	0.2	-	
オーガニック	ポリイミド		25	0.2	-		

2. ヒートシンクとしてMo採用

1960年代初頭、大手エレクトロニクスメーカーで、水銀整流器に代わり大型Si半導体 (φ50~φ60mm) を大電力制御に用いる開発がスタートした。Si素子の割れを回避するために、ベース板材料としてSiとほぼ同じ熱膨張率のMoが選択され、多くの信頼性試験を経て、64年開通の新幹線用電力変換器 (サイリスタ) に東タン製Moベース板が初採用された。下って70年代には車載用半導体でも長期信頼性の問題が発生し、半導体Si素子-Mo薄板-Cu放熱板の三層構造にすることにより熱ストレスを軽減し問題を解決した。当初は東タン製、現在はアライドテック製として角板外径四角3.0~16mm×厚み0.5~1.5mmの20種類程が40年以上量産納入されている。またこれら製品には、半田との濡れ性を良好に保つためにメッキ (当初は半田メッキ、後にはニッケル (Ni) メッキ) が施されている場合が多い。東タン独自にMoへの安定したNiメッキ技術が確立された。さらには予めはんだをMo薄板上に接合する予備はんだ技術も確立し、顧客での生産性向上に貢献することになる。

3. セラミックパッケージヒートシンク材としてのCu-W

1982年春に、セラミックパッケージメーカーにメタライズ用W粉末やMo製のセラミック焼成用敷板を納入していた東タンが、大手客先からIC (Integrated Circuit) 用セラミックパッケージ (ピングリッドアレイ) の放熱性の改善を狙い、放熱板の需要ありとの情報を入手した。その中で、米国製のCu-W (銅とタングステンの複合材) を用いたパッケージの試作を行ったが、放熱性は優れているもののC.T.E.のバラツキが原因の反りにより製造歩留が悪く本格採用できないとの情報を得た。そこでCu-WをICパッケージの放熱板の第一候補材に絞り、パッケージの主要材料であるアルミナ (Al_2O_3) のC.T.E.に近くバラツキが小さいCu-W開発に着手した。住友電工ではCu-Wを30年以上前から電気接点材として粉末冶金法 (焼結法や溶浸法) により製造していたが、大きな製品 (外径四角20~50mm×厚み2~5.0mm) が中心でC.T.E.のバラツキは十分考慮されていなかったためほぼゼロからの開発を行い、約1年の後、溶浸法で製造する新材質: 商品名CMSH® W-10 (Cu量10%-W量90%) を誕生させた (写真1)。

82年7月には材料及び応用に関する特許 (半導体基板用に用いるCuとWまたはMo焼結体) を申請した (その後、特許第2135368号として登録された)。後に判明したことであるが、住友電工が出願して間もなく、開発相手先やP.R.を行った客先からもCu-Wを使用したアルミナパッケージに関する特許が出願されていた。しかも一件の特許は住友電工よりも早く出願されていたが、この特許を早い時点で買い取ることができ、特許面で優位に立つことができた。83年春には、初の大口受注を獲得し、順調に販売は伸長した。他方、電気接点材より大幅に低い水準の価格を要求され、そこで内

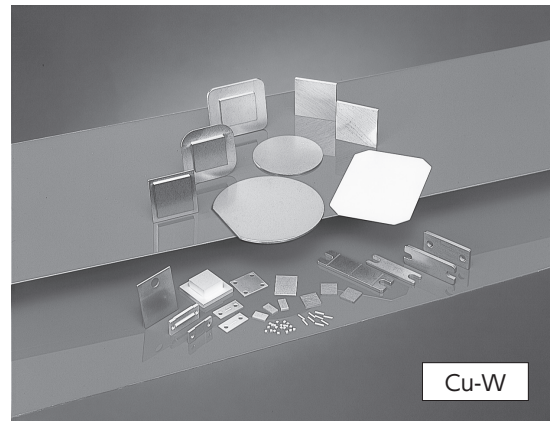


写真1 各種用途のCu-Wヒートシンクの外觀写真

製を基本に安価設備の導入や自動化を進めコスト低減を積極的に進めていった。さらにヒートシンクには厳しい寸法公差、表面面粗度が必要となり、ホーニング (研磨加工) やラッピング (定盤研磨加工) 装置を導入し仕上げ加工の改善を進めた。また更なる拡販に向けて国内のみならず海外のパッケージメーカーにも売り込みを開始した。その後、ICパッケージ用途から大型コンピュータのデバイス用ヒートシンクにも採用されて着実に売上を伸ばし大型事業に成長していった。この間技術面では、Cu-Wのメッキ技術の内製化を実現し、NCフライス (数値制御平面削り加工) のワーク供給と排出の自動化を行い、コスト競争力を次第に高めていった。

91年8月にはヒートシンク専門の製造会社を住友電工と東タンとが各50%出資して(株)アドバンストマテリアル (以下、AMIと略す) を山形県酒田市に設立し、国内二生産拠点を完成させた。

93年に急速に普及し始めたパソコン用CPU (中央演算装置) 用ヒートシンクとしてW-10が採用され、その需要に応えるための大増産を実施した (図2)。この間95年には阪神淡路大震災が発生しCu-Wの主力工場であった伊丹製作所が被災して生産ストップの状況となったが、AMIでは代替生産とさらなる大増産を行いこの未曾有の難局を乗り越えることができた。国内二か所生産体制というBCP (Business Continuity Plan: 事業継続計画) が効を奏した好例となった。本需要は97年末までの約4年の間、記録的な売上を達成して順調に伸びるかに見えたが、後述する実装方法の進化

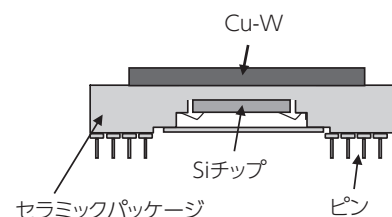


図2 パソコン用CPUのCu-Wヒートシンクの初期適用構造図

とパッケージ材質がプラスチックへと変わり2000年までに終息した。しかし、Cu-Wの需要は携帯基地局向けから光通信向けへと変遷を経ながらもヒートシンクの主力材料の一つとして現在まで生産を継続している。

4. 安価Cu-Moヒートシンクと三層構造CPC®の開発

90年代ヒートシンク材料としてはCu-Wが先行していたが、97年に溶浸法をもちいた大型インゴットの製造に加え圧延や打ち抜きプレスなど安価工法が可能な(Cu-Wは機械加工仕上げ必須) Cu-Mo(銅とモリブデンの複合材料)材料の開発に成功した。Cu-MoはCu-WよりもT.C.が高く、軽量であることから、その後Cu-WからCu-Moへの切り替えが進むことになった。さらに翌98年、Moの後継材料として90年代前半に開発したCMC(Cu-Mo-Cu)のクラッド技術を応用し、Cu-Moを芯材にして、両面にCuを貼り合わせた三層構造のクラッド材(以下「CPC®: Cu-PCM(Cu-Mo)-Cu」)の開発に成功した。このCu-MoとCPC®が現在に至るまでヒートシンクの主力材料として継続している。

Cu-Mo材料開発の契機となったのはハイブリッド電気自動車(H-EV)の開発である。駆動用バッテリーの直流電力を交流に変換し、H-EVの心臓部であるモーターの出力制御を行うインバータは大きな発熱を伴い、水冷ラジエータとIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor: 絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ)素子の間に大サイズの放熱板(外径四角 約180×80mm×厚み3mm、3~4枚)を用いる構造が採用された(図3)。当初米国製のAl-SiCが用いられたが、半田の濡れ性に起因する品質問題、さらにはAl-SiC製造会社自身の問題が起きるに至り、PRと開発を地道に続けていたCu-Moが急遽代替材として採用されるに至った。

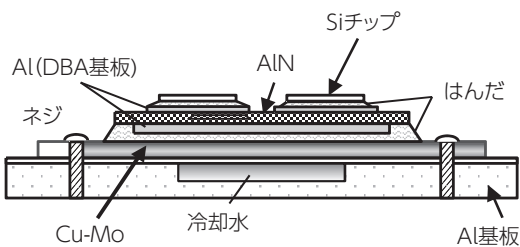


図3 ハイブリッド電気自動車インバーター・デバイスのCu-Moヒートシンクの適用構造図

さらに2003年発売の次車種では新材料CPC®(三層クラッド材)が採用され、加えて電機メーカーを通じモーターや発電機とバッテリー間の直流/交流変換を担うコンバータにもCPC®放熱板が採用されることになった。H-EVはヒットを続け、増産に加えて車種展開が急ピッチで進み当初想定を遥かに超える数量が見込まれた。酒田地区の既存工場のレイアウト

を工夫しながら生産能力拡大に努めたが、2005年12月にはH-EV用ヒートシンク専用工場として新工場を立ち上げた。この工場はCu-Mo合金から加工・メッキ・検査までを一貫して生産でき、移動ロスを最小化し生産性向上を実現した。そんな中、原料として用いているモリブデン粉末の価格が大幅に上昇した。相場基準として用いられる酸化モリブデンの価格が従来1ポンド当たり\$3~5であったものが\$30以上へと6倍以上に急騰した。それまでMo建値は小幅な動きしかなかったことからMoやCu-Mo製品では価格のMo原料スライド制を採っておらず、価格は固定制(当初Mo建値で設定)のみであったため、一時期非常に厳しい事業状況になった。営業はMo相場スライド制を求め客先への状況説明等を含め、なんとか全ての客先でMo原料相場スライド制の導入を認めていただいた。他方工場では材料ロス削減や歩留向上に取り組み、最終的には種々の改善手法を身につけることに繋がり大幅な体質向上に結びついた。2005年4月に開始したTPM活動(全社的生産革新活動)は、酒田地区に定着し現在でも継続している。2008年段階では国内販売のほぼ全H-EVでアライドテック製の放熱板が採用されるに至ったが、その後放熱板を使用しないインバータやコンバータの構造開発が進み、2014年本用途はほぼ終息した。



写真2 各種用途のCu-Moヒートシンクの外観写真

無線用途に使用される高周波パッケージにも現在ではCPC®がメインに使用されている。80年代から90年代前半まではCu-W以外にもCuが使用され、航空宇宙や大規模電話局間通信に用途が限られ数量的にも少量であった。90年代後半から携帯電話が急速に普及し始め携帯電話基地局用途の需要が急激に拡大していった。半導体もバイポーラトランジスタからLDMOS(横方向拡散金属酸化膜半導体)に進化する中、セラミックスによる絶縁を必要とするパッケージから金属板上に直接半導体を載せる構造となり、高熱伝導と低熱膨張を有するCu-Wが最適な材料として使用された。この頃から携帯電話は、先進国からアジア・アフリカを含む全世界に普及

し、さらに当初の音声のみからメールさらにスマートフォンの開発に合わせ画像やデータ通信など情報量も飛躍的増加することになる。それにあわせ携帯基地局用のヒートシンク需要も現在に至るまで凸凹はあるが年単位では大幅な増加を続けている。材料もCu-Wから2005年CPC®への切り替えを進め本市場で高いシェアを維持している。CPC®は表面がCuのため放熱性が格段に優れ、さらにパッケージの組み立てに当たっても表面がCuのためNiメッキが不要であるなど、理想的なLDMOS用の放熱材料と評されている(写真3、図4)。

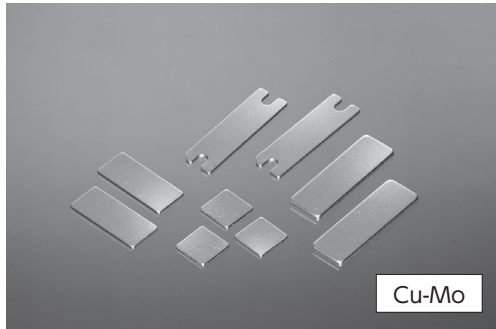


写真3 通信用Cu-Mo (CPC®) ヒートシンクの外観写真

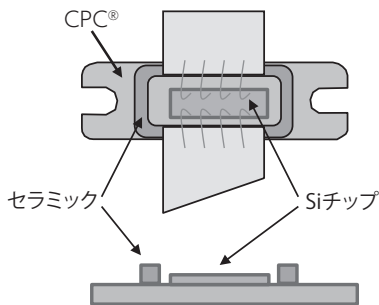


図4 通信基地局SiデバイスのCu-Mo (CPC®) ヒートシンクの適用構造図

生産は山形県酒田市の(株)アライドテック (株)アライドマテリアルの製造子会社：旧AMI) で行っていたが、14年には顧客の海外展開にあわせヒートシンク事業では初の海外展開となるタイへのCPC®ライン新設を行い、海外も含めたBCP対応のモデルを作った。

5. 新材料開発 (スミクリスタル®/CVDダイヤモンド、A-40 (AlSi)、焼結Al-SiC)

タングステンやモリブデン系の材料では限界がある高熱伝導率や軽量化のニーズに即した新材料開発も継続的に行ってきた。1982年から90年代初頭にかけてはスミクリスタル®

/CVDダイヤモンドやA-40 (87年に伊丹研究部で開発完了のAlに40%Siを加えた粉末冶金法で製造される新材質) の開発に成功し、積極的なP.R.活動により高いT.C.特性を要求するレーザー分野ではスミクリスタル®/CVDダイヤモンドが、軽量が要求される航空宇宙分野ではA-40が採用された。

94年にはパソコン用CPUの実装方式により新たなヒートシンクのニーズが生じた。すなわち従来の電気配線と放熱の両方をパッケージに担わせる方式からパッケージの役割は電気配線のみとなり、チップ上部に凹型の蓋 (リッド) をかぶせ放熱を担わせる方式に大きく変更されることが決まり、このリッドに高熱伝導且つ軽量材料が求められた。

そのため住友電工では得意の粉末冶金技術を用いて、軽量で高熱伝導のアルミニウム (Al) とシリコンカーバイド (SiC) の粉末を、必要な熱膨張に合わせた比率で混合した上金型に投入しリッド形状を成形し、その後焼結法により機械加工無しで製造する焼結Al-SiCを開発した。Al-SiC材料自体はSiCの多孔体に熔融したアルミニウムに圧力を付加浸透される手法にて他社から既に市販されていたが、リッド形状を作るためには機械加工を必要とし、さらに加圧のための大型設備も必要とするため、粉末冶金技術をそのまま適用できる焼結Al-SiCは画期的な材料であり、特許も取得し各社に採用を働きかけることになった(写真4)。

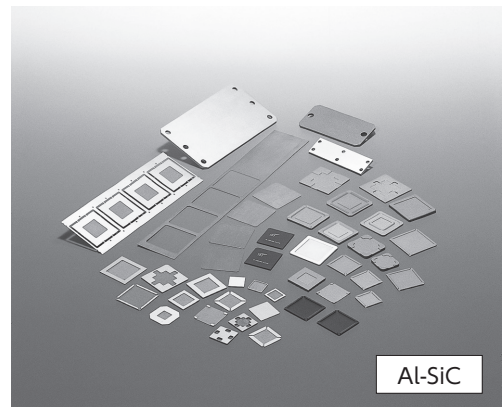


写真4 各種用途のAl-SiCヒートシンクの外観写真

最終的にパソコンCPU用ではセラミックパッケージからプラスチックパッケージとなり、アルミニウム合金や銅のリッドが使用できるようになって、巻き返しが成らず採用には至らなかった。しかし2000年以降数量を伸ばしたサーバー用途に広く採用されることになり、国内外の大手電算機メーカーや半導体メーカーに次々に採用され一時代を築くことができた(図5)。さらに派生材質のSi-SiC材により念願の世界最大手コンピュータメーカーへの参入を果たすことができた。また2012年に日本で稼働した世界最速スーパーコンピュータ「京」への搭載が関係者を大いに喜ばせた。

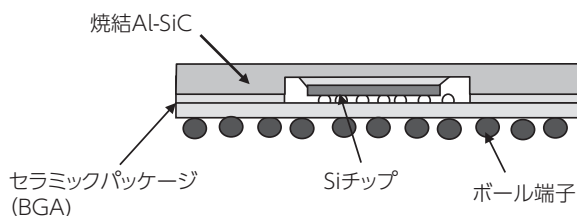


図5 PCサーバや大型コンピュータの適用構造図

現在、焼結Al-SiCはサーバー用途では価格面がネックになり2004年頃からCuへの回帰が起り終息していったが、車載用ECU（エンジンコントロールユニット）用途では継続して使用されており、2004年に伊丹事業所から展開した(株)アライドマテリアル富山製作所にて生産を行っている。富山のヒートシンク部門は、ヒートシンクの世界材料開発の拠点としての役割も担っており、焼結Al-SiCの次世代と言える新製品 (Mg-SiC) を量産準備中である。さらにスミクリスタル®/CVDダイヤモンドの次世代材料としてCu-Diaを上市済みだが、次々世代とも云えるダイヤ系の新材料についても近々投入予定である。

なお、ヒートシンク関連で現在までに登録(出願中を含む)された特許を(表2)に示す。

表2 ヒートシンク関連特許(出願中も含む)

材質	出願日	登録番号	発明の名称
Cu-W、 Cu-Mo関連	1982年7月26日	特公平07-105464	半導体素子搭載用半導体装置
	1983年1月31日	特公平05-038457	半導体基板材料
			計35件、他に出願中3件
Al-SiC、 Mg-SiC関連	1995年10月4日	特許3493844	半導体基板材料とその製造方法及び該基板を用いた半導体装置
	1997年5月9日	特許4080030	半導体基板材料、半導体基板、半導体装置、及びその製造方法
			計27件、他に出願中2件
Al-Si(A-40)、 Si-SiC関連	1990年1月22日	特許2748629	半導体装置収納用ハウジングおよびその製造方法
	2000年6月8日	特許第4360061	半導体装置用部材およびそれを用いた半導体装置
			計4件
Cuダイヤ、 ダイヤ系関連	1997年2月6日	特許3617232	半導体用ヒートシンクおよびその製造方法ならびにそれを用いた半導体パッケージ
	1997年8月19日	特許3893681	半導体用ヒートシンクおよびその製造方法
			計6件、他に出願中5件

6. 結 言

半導体部品の進化の過程では「ヒートシンクレス」が常に検討課題に上がるが、一方で半導体の高集積化など性能向上により発熱量が増加し放熱基板の役割が一層増すケースも多い。例えば素子に関して言えば2000年代当初には近い将来SiからGaAs（ガリウムヒ素）に替わり、その次にはSiC（炭化ケイ素）やGaN（窒化ガリウム）に置き換わっていくと云われていた。大きな流れはその通りだが、Siも高密度化による製品寸法削減やウエハの厚みの減少など生き残りのための

製造コストの低減が、かえって放熱板の役割向上に結びつくケースも多い。当然高出力動作が可能なSiCやGaNは放熱の重要性を増加させている。いずれにせよヒートシンクはこの素子を縁の下で支える役割を担っており黒子に徹することが重要であり、主役には成りえない。しかし常に最先端の半導体技術や製品開発とリンクしており実に面白い仕事をさせて頂ける分野である。材料、製法とも栄枯盛衰の繰り返しであるが、なくなりたくないのが、この事業の真髄と思う。顧客からはこれからも種々の希望、要望が出てくるが、一つ一つに真摯に対応して、新材料、新製法を他社に先駆けて開発し、これらのニーズに応え住友電工グループにヒートシンクのアライドありと云われ続けたいと考えている。

参 考 文 献

- (1) 長田光生、奮闘40年(2006年 自費出版)
- (2) ニアネットCuW：大町正弘 他、「半導体放熱基板用ニアネットCu-Wの開発」、SEIテクニカルレビュー第149号(1996) pp121-125
- (3) A40：花田正澄 他、「電子部品用低熱膨張アルミニウム粉末合金CMSH® [A-40]」、SEIテクニカルレビュー第134号(1989) pp196-200
- (4) 焼結Al-SiC：山形伸一 他、「焼結Al-SiC半導体放熱基板の開発」、SEIテクニカルレビュー第157号(2000) pp85-89

執 筆 者

勝谷 洋*：(株)アライドテック
社長



山形 伸一：(株)アライドテック ヒートシンク部
部長



中村 泉：(株)アライドマテリアル
取締役支配人



*主執筆者