

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05944

研究課題名(和文)超音波による接合温度分布計測：パワー半導体高信頼化の革新的評価技術

研究課題名(英文)Temperature distribution imaging for power devices by ultrasonic wave

研究代表者

渡邊 晃彦(Watanabe, Akihiko)

九州工業大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：80363406

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：個体内部を伝搬する音の速度が材料の温度変化に依存して変化することを利用し、パワーデバイス内部の温度分布を可視化する原理を実験的に確認した。この原理を実験的に確認するための測定手法を超音波顕微鏡、デバイス通電機構、デバイス冷却機構、温度計測機構を統合して確立した。デバイス内部の温度変化に対応し、内部界面からの反射波の検出時間が変化することされることが実験的に確認された。また、温度分布の解析および可視化のためにデバイス内部の温度勾配を解析するツールの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：The principle of visualizing the temperature distribution inside the power device was experimentally confirmed. This technique is utilized the principle that the speed of the sound propagating inside the devices changes depending on the temperature change of the material. Measurement method for experimentally confirming this principle was established by integrating ultrasonic microscope, power supply system, device cooling system, temperature measurement system. It was experimentally confirmed that the detection time of the reflected wave from the interface changes depending on the temperature change inside the device. In order to analyze and visualize the temperature distribution, a simulation tool to analyze the temperature gradient inside the device was also developed.

研究分野：電子デバイス、電気・電子材料

キーワード：パワーデバイス 熱解析 信頼性 超音波顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

パワーデバイスによるエネルギーの有効利用は、再生可能エネルギーの開発と並んでエネルギー問題解決の鍵となる技術である。パワーデバイスは小型化・高集積化によって適応範囲を広げ、市場に大量に投入されつつある。しかしながら、小型化・高集積化はデバイスの高パワー密度化につながり、現在よりも高度な故障リスク管理が求められる。また、高パワー密度化は、熱や電流による高速な破壊現象や広範囲なダメージを引き起こし、従来の故障後の解析では故障原因の特定が困難になりつつある。そこで、故障原因の発生から故障に至るまでの過程、すなわち故障メカニズムを明らかにし、抜本的な高信頼化を目指す必要がある。

パワーデバイスは、半導体チップや配線、絶縁材料、はんだなどの接合材料、放熱のための熱伝導材料、パッケージ材料といった性質の異なる材料を接合して構成される。また、パワーデバイスは基本的に通電と遮断を繰り返すスイッチング素子である。大電力をスイッチングする際にパワーデバイスは発熱、放熱を繰り返し、熱膨張率の異なる材料間では応力や歪といった機械的なストレスが加わる。この機械的なストレスが長時間使用の間に蓄積され、最終的にデバイスの故障に至るため、デバイス開発ではシミュレーションを用いて熱解析を行い、信頼性を担保している。

一方で実際のデバイスで起こる故障を解析するためにはデバイス内部の温度分布のモニタリングが大きな課題である。従来の温度計測は、接触・非接触方式に関わらず表面温度を計測するため、デバイス内部の温度分布を測るためには、目的の部位を計測できるよう加工する必要がある。このため、積層構造を持つパワーデバイス内部の温度分布を放熱過程に影響を与えずに測定することは困難である。

申請者は、固体内の音速が、材料の温度により変化することに着目し、超音波を用いた非破壊温度分布測定に着想に至った。温度測定に超音波信号を利用することで、先行開発したリアルタイム故障モニタリングシステムとの統合も可能であり、パワーデバイスの故障メカニズムを複数のパラメータから解析することが可能になる。

2. 研究の目的

本研究は、超音波を利用して内部温度分布イメージを非接触で計測する技術を確認し、開発済みの構造変化モニタリングの技術と融合することでパワーデバイスの高信頼化技術へ応用することを目的としている。

本研究では、固体内部の2次元温度分布を、超音波を用いて検出する方法を開発することが鍵となる。そのために、以下のことを明らかにする。

(1) 音波による積層構造での界面温度検出

手法の開発

超音波を用いた固体内部温度測定について、単一物質内の深さ方向の温度分布を測定可能であることがすでに実証されている。本研究で観察対象としているパワーデバイスは、積層構造を持つことから、上記原理を積層構造に応用した理論式を導出し、反射波信号から狙った界面の温度変化を抽出する信号処理プログラムを開発する。

(2) 絶対温度測定の検証

①により観察界面の相対的な温度分布のマッピングが可能になる。さらに詳細な温度測定を実現するために、他の手法で測定したデバイス内部の半導体チップの温度と、超音波による温度測定の比較を行い、絶対温度測定が可能であるかを明らかにする。

(3) システム統合に向けた問題点の検証

デバイス内部の温度分布と欠陥の発生・進行とを、同時に視覚化するシステムを目指し、システム統合に向けた問題点の検証を行う。

3. 研究の方法

本研究の第一の目的を達成するために、実際のデバイスを用いて原理確認を行う。動作中デバイス内部の超音波画像観察する方法は実証済みであり、この装置を用いて各画素点での超音波波形を取得する方法を開発する。温度変化を可視化するためには、通電・遮断の任意のタイミングで超音波波形を取得するシステムを構築し、実デバイスを用いて内部温度変化に対応した波形変化が現れることの原理確認を行う。

また、超音波波形から面内の温度分布を得るためのツールを開発する。得られる超音波波形は反射波のみであり、デバイス内部で超音波の反射がおきた場所の温度変化が得られると考えられる。そのポイントの温度を導出するためには、超音波がそのポイントに到達し反射波が検出されるまでの経路において、音速の変化を導出する必要がある。そのために温度分布デバイス内部の温度シミュレーションを組み合わせた音速解析ツールを開発する。

4. 研究成果

(1) 原理の机上検討

無限媒体の縦波の音速度 V は E (ヤング率)、 ρ (密度)、 σ (ポアソン比) とすると次式で表される。[1]

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}}$$

ポアソン比に関する $\sqrt{\quad}$ の項は $\sqrt{E/\rho}$ に対して十分小さいので、音速はおおよそ $\sqrt{E/\rho}$ に比例するといえる。

ヤング率の温度依存性データ [2, 3] から Cu とはんだ (PbSn) における音速の温度依存性を計算した結果を表 1 に示す。この表からわかるように、ヤング率の温度依存性は金属材料に比べてはんだの方が強く、室温から 150

度に温度が変化した場合、音速は Cu では 80m/s 遅くなるのに対し、はんだでは約 400m/s ほど遅くなると考えられる。

表 1. ヤング率の温度依存性と音速変化の見積り

Cu [2]			
temp(°C)	ヤング率 [g/(s ² ・m)]	√(ヤング率/密度) [m/s]	音速(室温) との割合[%]
0	1.112E+14	3.535E+03	100.40
23	1.104E+14	3.521E+03	100.00
50	1.093E+14	3.504E+03	99.52
100	1.074E+14	3.473E+03	98.64
150	1.054E+14	3.442E+03	97.74

はんだ(PbSn) [3]			
temp(°C)	ヤング率 [g/(s ² ・m)]	√(ヤング率/密度) [m/s]	音速(室温) との割合[%]
0	3.190E+13	1.937E+03	103.30
23	2.990E+13	1.875E+03	100.00
50	2.754E+13	1.800E+03	95.99
100	2.319E+13	1.652E+03	88.07
150	1.883E+13	1.488E+03	79.37

(2) 実験による原理確認

本研究の原理は、温度変化に対する材質中の音速変化を超音波の反射波を用いて検出することにある。この原理を実験的に確認するための計測方法を確立した。計測装置は超音波顕微鏡、デバイス通電機構、デバイス冷却機構、温度計測機構を統合して構築した。超音波観察には 50MHz のトランスデューサを使用し、各観察点での超音波波形を取得するモードで使用した。デバイス通電機構は、コンピュータ制御により電圧および通電時間を任意に設定できるようにし、任意のタイミングで超音波観察がスタートできるように、超音波顕微鏡とリンクさせている。本研究ではデバイスの内部の温度変化のみを抽出することを目的とするため、デバイス表面温度が一定となるように観察水槽内部の水を循環させ一定温度に保つようにした。温度計測はデバイスの観察面(Cu ベースプレート表面)と水温を、光ファイバセンサを用いて計測するとともに、赤外線カメラを用いてケース温度もモニタリングしている。また、デバイス内部の温度評価のために、デバイスに微小電

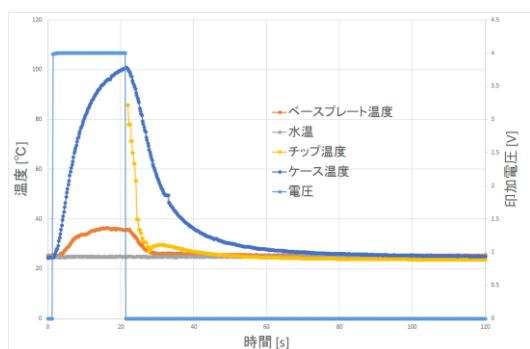


図 1. 各パラメータ測定例

流を流したときの電圧をモニタリングし、予め測定しておいたこの電圧変化の温度特性からチップ温度を見積もっている。図 1 に各パラメータの測定例を示す。

この計測手法を用いて、実験による原理確認を行った。サンプルデバイスとして T0-220 パッケージのパワー MOSFET を用いて室温で超音波反射波を観察した際の結果を図 2 に示す。超音波は Cu ベースプレート側から入射し、図 2 上図のチップがある領域からの反射波を示している、同図中は反射波からデバイス内部の構造を画像化した図で左側から Cu、はんだ、Si チップ、パッケージレジンの領域がわかる。同図下の反射波形中のピーク①は Cu/はんだ界面、②ははんだ/Si チップ界面、③チップ/レジン界面からの反射波ピークである。

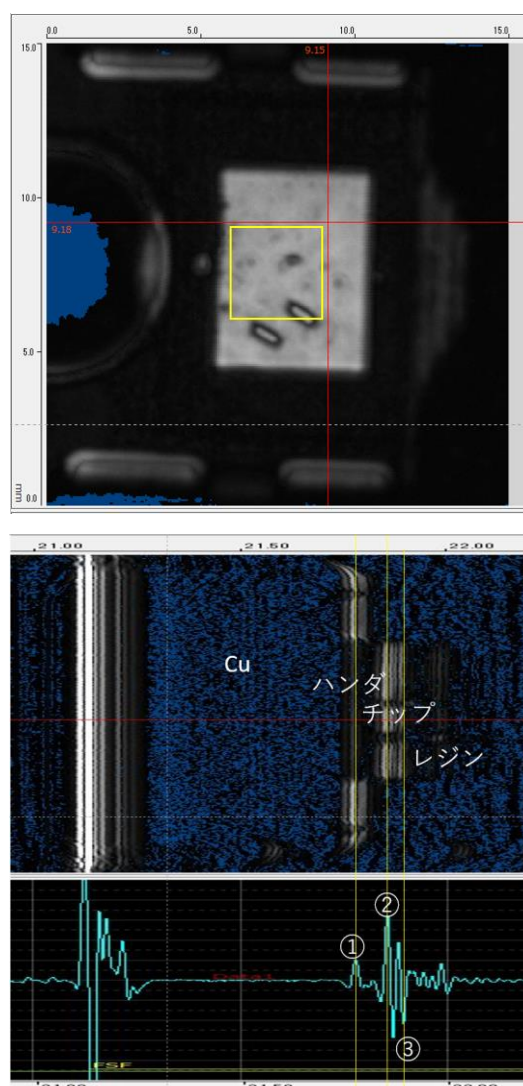


図 2. 室温での観察結果

このデバイスに 20 秒間通電した時点(ケース温度 100°C)で通電を遮断、測定した超音波波形を図 3 に示す。室温の波形とは Cu 表面からの反射ピークで時間軸を合わせている。この波形を解析すると①Cu/はんだ界面と②はんだ/Si チップ界面からの反射波には、両

者の間にほとんど時間差は見受けられないが、③チップ/レジン界面からの反射波で僅かな時遅れ(40nS)が検出された(図4)。

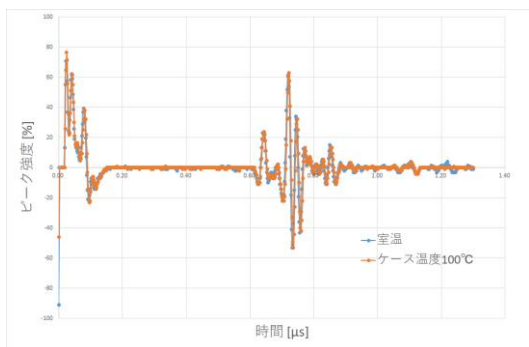


図3. 室温とケース温度 100°Cでの波形比較

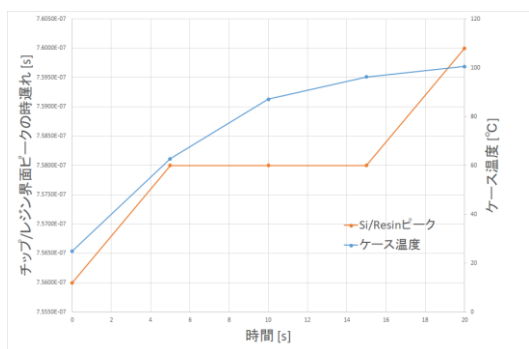


図4. チップ/レジン界面ピークの時遅れ

(3) 温度解析ツールの作成

実験的に求められる超音波の平均速度を用いれば、相対的な温度分布の2次元化は可能である。しかしながら実際には材料内部の温度勾配があるため、材料内部での超音波速度は均一ではなくなる。このことを考慮した超音波波形解析を行うために、(2)の測定方法に対応した温度解析ツールを作成した。本ツールは、離散化した非定常熱伝導方程式をMATLAB上にコーディングしたものである。モニタリングしているデバイスの内部のチップ温度および表面温度を境界条件として用い、内部の温度分布を計算することが可能である。本解析ツールを3次元で適用した例を図5に示す。この温度解析ツールの各解析ポイント(コントロールボリューム)で温度に対する音速をアサインすることで、パッケージ内部の温度勾配を含めた音速解析が可能になる。

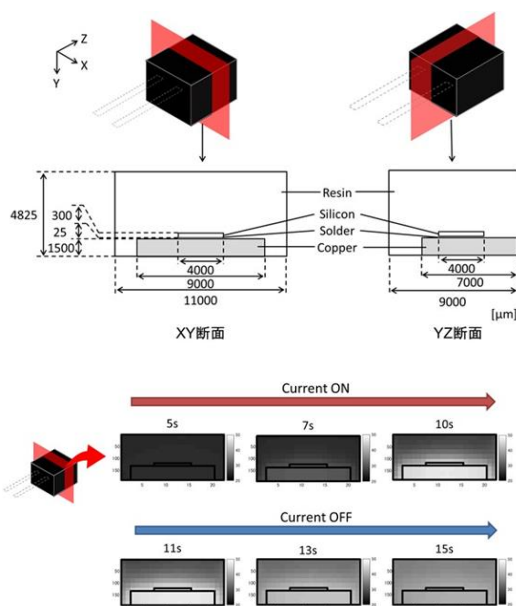


図5. 温度解析ツールの適用例

上図: 解析モデル

下図: チップの自己発熱によるパッケージ内部温度変化

<引用文献>

- ① 実吉純一 他、超音波技術便覧、新訂版、日刊工業新聞社、1978.
- ② ASME B31.1-1995
- ③ H. Ma, J.C. Suhling, A review of mechanical properties of lead-free solders for electronic packaging, J. Mater. Sci. pp.1141-1158, 2009.

5. 主な発表論文等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 晃彦 (WATANABE, Akihiko)
九州工業大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 8 0 3 6 3 4 0 6

(2) 研究分担者

大村 一郎 (OMURA, Ichiro)
九州工業大学・大学院生命体工学研究科・教授
研究者番号: 1 0 5 1 0 6 7 0

(2) 研究分担者

附田 正則 (TSUKUDA, Masanori)
北九州市環境エレクトロニクス研究所・先進パワーデバイス研究室・主任研究員
研究者番号: 0 0 5 7 9 1 5 4