

# 電子デバイスの品質及び信頼性評価技術

西田雄治 Yuji Nishida  
山口善孝 Yoshitaka Yamaguchi  
田中弥生 Yayoï Tanaka  
山本隆之 Takayuki Yamamoto

キーワード X線照射, 断面加工技術, 寿命加速試験

## 概要



FIBとX線CT

分析センターでは、お客様に品質と信頼性の高い製品を提供するため、製品に使用される半導体デバイスの品質評価や周辺材料などの信頼性試験を実施している。これらの評価を迅速かつ正確に行うことで、デバイスの内部及びその周辺で発生する問題を解決し、製品の品質と信頼性を向上している。

半導体デバイスの品質評価技術では、X線CT（Computed Tomography）検査による電気的特性変動を防止するためのX線照射条件の最適化や、集束イオンビーム（FIB：Focused Ion Beam）で冷却ステージを用いた供試サンプル断面の加工精度を向上した。信頼性評価技術では、パワーサイクル試験装置を用いた熱ストレスに対するデバイス周辺部材の耐久性試験などの技術開発に努め、不具合の未然防止と製品の品質と信頼性の向上に貢献している。

## 1 まえがき

当社は、お客様に電子機器・情報機器・変電機器など多岐にわたる製品を提供している。これらの製品は、パワー半導体デバイスなどの電子デバイスが用いられ、それぞれに高い品質が求められている。分析センターでは、お客様に品質と信頼性の高い製品を提供するため、使用される半導体デバイスの品質や信頼性を評価している。

半導体デバイスの品質評価では、新規採用するデバイスの内部材質や構造上の欠陥などを調査して、将来故障が発生する可能性を推定する良品解析や、納入先や製造工程で発生したデバイスの故障状況を調査し原因の究明を行う故障解析がある。これらの分析では、X線によって非破壊で内部構造を確認する方法や、樹脂パッケージを開封して内部構造を解析する方法などが用いられる。

一方、半導体デバイスの信頼性評価では、デバイスやその周辺材料の故障発生を予測・予防するために、環境ストレスや熱ストレスを与えて潜在的な欠陥を顕在化させ、寿命を推定し要求性能を満足するか確認する方法が用いられる。これらの分析評価によって、品質・信頼性を確認し、製品設計に反映させ製品の品質・信頼性向上に貢献している。本稿では、これらの品質評価や信頼性評価を活用し製品の品質と信頼性を支えるための分析評価技術を紹介する。

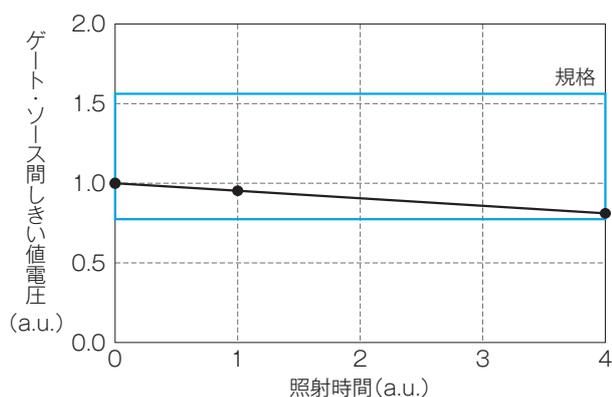
## 2 X線観察技術及び検査条件の最適化

X線観察は、半導体デバイスを開封せずにデバイス内部の構造を観察できる非破壊分析手法として広く使われ、最近ではX線CT（Computed Tomography）観察が主に使用されている。CT観察では、X線照射時間が長いため、半導体デバイス観察後に電氣的

特性が変動してしまう。この変動による誤判断を防止するため、統計手法の一つである応答曲面法を活用し、X線照射条件を効率よく最適化した。

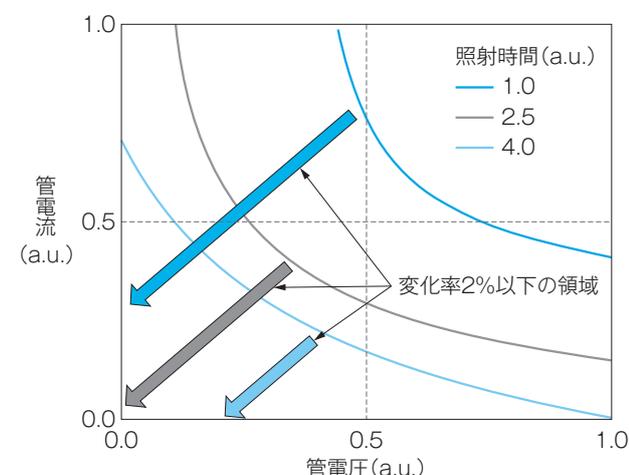
対象の半導体部品としてMOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) を選択した。第1図にゲート・ソース間しきい値電圧 (以下、しきい値電圧) の照射時間依存性例を示す。しきい値電圧は、電気的特性における重要なパラメータである。X線装置は直交CTを用い、表面 (チップのソース電極側) からX線を照射した。

次に、X線照射条件としきい値電圧の関係を調べた。3因子 (管電圧・管電流・照射時間) をそれぞれ3水準、繰り返し2回の総あたり実験をすると実験回数は54回 (= 3^3 × 2) となる。今回、実験デー



第1図 ゲート・ソース間しきい値電圧の照射時間依存性例

MOSFETへのX線照射時間を増加すると、しきい値電圧が変動する。



第2図 MOSFETのしきい値電圧変化率2%以下の領域例

照射時間が増加すると、しきい値電圧変化率2%以下を満たす管電圧・管電流の領域が小さくなる。

タに基づいて特性と因子 (特性の評価条件) との関係を低次 (通常, 1 ~ 2次) の多項式でモデル化し、最適条件を探索する応答曲面法を活用することで実験回数を17回に削減した。しきい値電圧の変動は式(1)に示す変化率で評価した。

$$\text{変化率} = (1 - \text{照射後しきい値電圧} / \text{照射前しきい値電圧}) \times 100 (\%) \dots\dots(1)$$

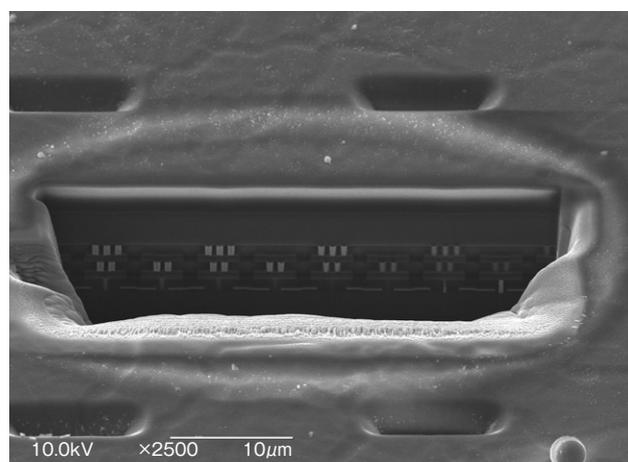
一般的に、管電圧・管電流を大きくすればX線画像は鮮明となるが、しきい値電圧の変動とX線画像の鮮明度のトレードオフを考慮する必要がある。第2図にMOSFETのしきい値電圧変化率2%以下の領域の例を示す。デバイスが使用できる領域は各曲線から矢印下方向の領域となる。

このように、効率的にX線照射の因子によるMOSFETのしきい値電圧の変動を可視化し、X線照射条件を最適化した。

### 3 電子デバイスの断面観察技術の向上

断面観察とは、電子基板に実装されている半導体デバイスのはんだ接合やめっき状態の観察、ICチップの構造解析など、部材の断面を作製して内部構造を検査する分析手法である。

第3図に集束イオンビーム (FIB: Focused Ion Beam) を用いて加工したICチップ断面の電子顕微

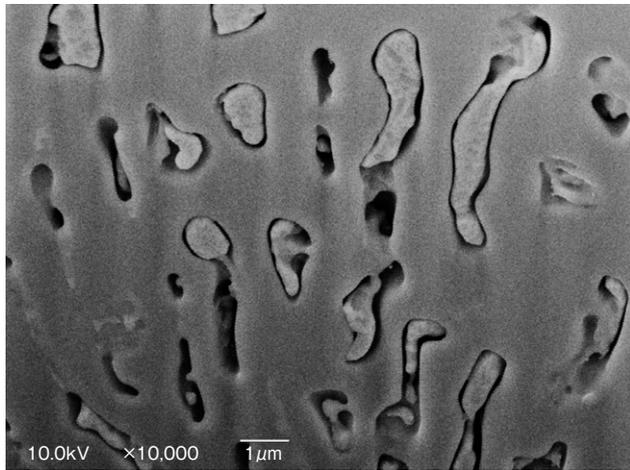


第3図 ICチップのFIB断面加工

ICチップをFIB加工し、ICチップの断面構造を解析する。

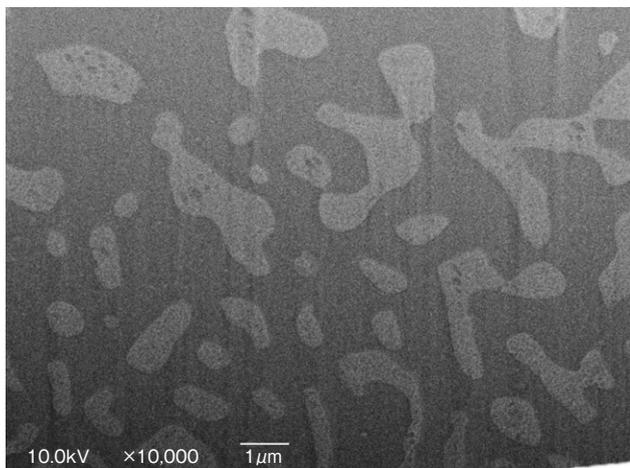
鏡像を示す。FIBはイオンビームを用いた加工機である。これを搭載した電子顕微鏡は、肉眼では確認できない数 $\mu\text{m}$ の微小箇所を拡大観察しながら断面加工ができる。

次に、FIBを用いた鉛入りはんだの断面観察について、FIB加工時の温度条件による差異を記す。**第4図**に常温で、**第5図**に低温（ $-50^{\circ}\text{C}$ ）下でFIB加工した鉛入りはんだの電子顕微鏡像例を示す。常温で加工した断面には、鉛と錫の粒界に空隙が観察される。一方、 $-50^{\circ}\text{C}$ に冷却した断面に空隙は観察されない。この比較から常温でのFIB断面加



**第4図** 常温でFIB断面加工した鉛入りはんだ電子顕微鏡像

常温で鉛入りはんだをFIB加工すると加工時の熱で鉛と錫の粒界に空隙ができる。



**第5図** 低温（ $-50^{\circ}\text{C}$ ）下でFIB断面加工した鉛入りはんだ電子顕微鏡像

冷却ステージを用いて $-50^{\circ}\text{C}$ に冷却しFIB加工すると熱による低融点金属の熔融損傷を軽減できる。

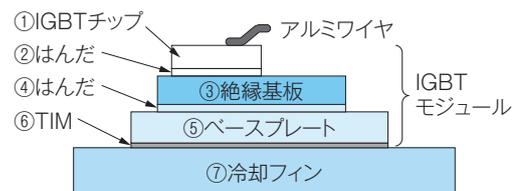
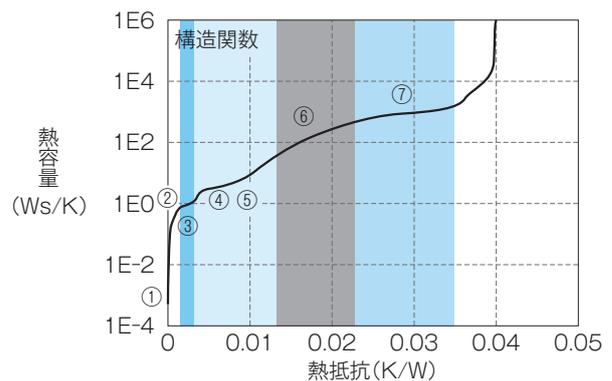
工は加工中に発生する熱で低融点金属を溶融することが分かった。また、試料を冷却することで熔融を軽減させる効果があることを確認した。

## 4 パワー半導体デバイスの熱的特性による信頼性評価技術

パワーサイクル試験装置は、パワー半導体デバイス自体を発熱源として利用し、冷却時の温度変化を測定することでチップから大気までの放熱経路の熱的特性を測定する機能を有している。**第6図**に一般的な構造関数の例を示す。測定によって熱抵抗と熱容量の関係を表す構造関数が得られる。これを解析することで熱的特性を評価できる。

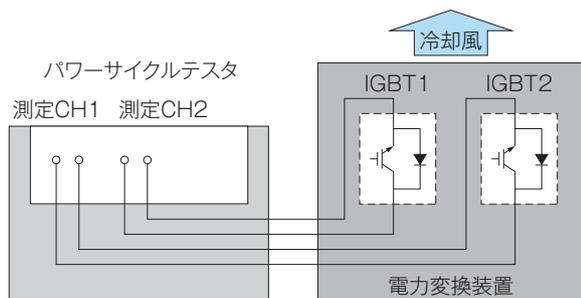
パワー半導体デバイスの寿命にとって熱は重要な要素であり、本試験によって信頼性を評価することができる。具体的な事例を以下に示す。

**第7図**にパワー半導体デバイスを用いた電力変換装置の熱抵抗評価例を示す。空冷フィンと組み合わせたIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュールのチップに実運用を想定した任意の負荷電力を入力し、チップ接合温度が設計どおりとなる



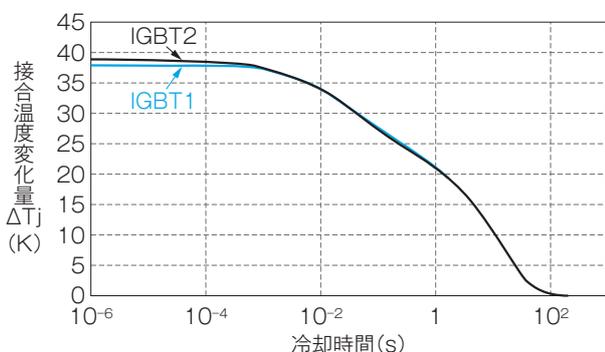
**第6図** 一般的な構造関数の例

過渡熱インピーダンス測定で得られる熱的特性を示す。横軸に熱抵抗、縦軸に熱容量をとりチップから大気までの放熱経路の熱的特性を示している。



**第7図** パワー半導体デバイスを用いた電力変換装置の熱抵抗評価の例

IGBT 2個を取り付けたパワー半導体デバイス装置に対して、空冷フィンによる強制空冷条件下で、パワーサイクル試験装置から実運用を模擬した負荷電力を入力し、チップ接合部の温度と熱抵抗値を評価している。



**第8図** 負荷電力オフ(冷却)期間のチップ接合温度変化 $\Delta T_j$ の測定結果

負荷電力オフ(冷却)期間のチップ接合温度低下の様子を示す。負荷電力による接合温度変化は最大値約38~39Kとなり、その後の通電オフ期間で十分に冷却される。

が評価した。その結果、**第8図**に示すようにチップ接合温度変化量 $\Delta T_j$ は約38~39Kとなった。これは設計による計算値約40Kに近い値であり、設計の妥当性を確認した。

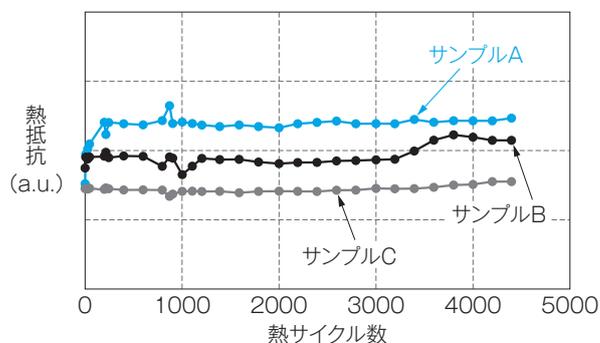
パワー半導体デバイスの信頼性にとって、デバイス自体の信頼性に加えて放熱材料など周辺材料の信頼性が重要である。より信頼性の高い放熱材料(TIM: Thermal Interface Material)を選定するため、三種類のサンプル(A・B・C)に対してパワーサイクル試験を行い、TIMの熱抵抗値の経時変化を比較評価した。**第9図**にTIM評価サンプルを示す。IGBTモジュールにTIMを塗布し、水冷フィンに取り付けた。また水冷フィンを垂直に設置することで、TIMにとって厳しい条件となる垂直取



サンプルA サンプルB サンプルC

**第9図** TIM評価サンプル

同じ形式のIGBT 3個を用い、異なる種類のTIM 3種を塗布して水冷フィンに垂直に取り付けている。



**第10図** TIMの熱抵抗経時変化の評価結果

パワーサイクル試験によるTIM 3種の熱抵抗値の変化を示す。サンプルAでは熱抵抗値の増加が大きいが、サンプルB・Cは熱抵抗値の増加が小さく耐久性に優位性がある。

り付けを模擬した。IGBTモジュールに対しケースの温度変化量 $\Delta T_c = 80K$ 、チップ接合温度変化量 $\Delta T_j = 100K$ となる通電条件の下でパワーサイクル試験を行った。**第10図**にTIMの熱抵抗経時変化の評価結果を示す。サンプルAではたれ落ちがあり、熱抵抗値の顕著な増加が見られた。これに対して、サンプルBとサンプルCの熱抵抗の増加は小さい結果となり、サンプルAに比べサンプルB・Cが信頼性に優れるという結果が得られた。

## 5 むすび

製品に使用される半導体デバイスの品質評価・長期信頼性試験における分析評価技術の事例を紹介

した。分析センターでは、今後も電気的特性や非破壊・断面分析などの物理解析を活用した分析技術の向上に努め、製品に組み込む半導体デバイスの品質と信頼性評価を提供し支援していく所存である。

- ・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

#### 《執筆者紹介》

---



**西田 雄治**  
Yuji Nishida

基盤技術研究所  
電子デバイスの品質評価及び信頼性評価業務に従事

---



**山口 善孝**  
Yoshitaka Yamaguchi

基盤技術研究所  
電子デバイスの品質評価及び信頼性評価業務に従事

---



**田中 弥生**  
Yayoi Tanaka

基盤技術研究所  
電子デバイスの品質評価及び故障解析業務に従事

---



**山本 隆之**  
Takayuki Yamamoto

基盤技術研究所  
電子デバイスの品質評価及び信頼性評価業務に従事

---