平成27年7月14日

電子回路実装技術の動向と パワーデバイス実装技術の課題

(大阪大学 産業科学研究所) 菅沼克昭

(内 容)



■ 実装高信頼化のために

✓ ウィスカとEM

- パワー半導体実装技術
- ダイアタッチ技術
 - ✓ 銀焼結接合
 - ✓ 銀膜ストレスマイグレーション接合

実装とはんだ付け

日本産業の付加価値:高品質・信頼性とその保証



実装の微細化が進みはんだが進み...

従来





Snの結晶構造と異方性



ヤング率 熱膨張係数 c軸 : 70 GPa 30 ppm/℃ a, b軸 : 20 GPa 15 ppm/℃

Snは、異方性が強い金属。。。。。

Snの異方性が影響



Handwerker *b*, Purdue Univ.

金属ウィスカと故障の歴史

- 1946 CobbがCdウィスカをレビュー
- 1950前後 電話交換機、ケーブルでSnウィスカ故障多発
- 1950以降 学術的取り組みで理論多数。Pb合金化である程度抑制
- 2000以降 ペースメーカー、スペースシャトル、商業衛星、原子炉
 Swatch(2006年損失額\$1bn)などの故障を発し深刻化

日本:コネクタ鉛フリー化で故障多発し、ウィスカ問題を再認識。

宇宙は特殊環境、ウィスカへの影響はまだ十分には理解されていない





ウィスカが関与したエレクトロニクス機器故障の歴史(2000年以降)

	年 故障機器	故障原因	故障部品
-	2000 GALAXY VII(Side 2) Space (Complete Loss)	Tin Whiskers	Relays
	2000 Missile Program "D" Military	Tin Whiskers	Terminals
	2000 Power Mgmt Modules Industrial	Tin Whiskers	Connectors
-	2000 SOLIDARIDAD I (Side 2) Space (Complete Loss)	Tin Whiskers	Relays
1	2001 GALAXY IIIR (Side 1) Space	Tin Whiskers	Relays
	2001 Hi-Rel Hi-Rel	Tin Whiskers	Ceramic Chip Caps
	2001 Nuclear Power Plant Power	Tin Whiskers	Relays
	2001 Space Ground Test Eqpt Ground Support	Zn Whiskers	Bus Rail
+	2002 DirecTV 3 (Side 1) Space	Tin Whiskers	Relays
	2002 Electric Power Plant Power	Tin Whiskers	Microcircuit Leads
	2002 GPS Receiver Aeronautical	Tin Whiskers	RF Enclosure
	2002 MIL Aerospace MIL Aerospace	Tin Whiskers	Mounting Hardware (nuts)
	2002 Military Aircraft Military	Tin Whiskers	Relays
	2002 Nuclear Power Plant Power	Tin Whiskers	Potentiometer
	2003 Commercial Electronics Telecom	Tin Whiskers	RF Enclosure
	2003 Missile Program "E" Military	Tin Whiskers	Connectors
	2003 Missile Program "F" Military	Tin Whiskers	Relays
	2003 Telecom Equipment Telecom	Tin Whiskers	Ckt Breaker
	2004 Military Military	Tin Whiskers	Waveguide
	2005 Communications Radio (1960s vintage)	Tin Whiskers	Transistor TO Package
	2005 Millstone Nuclear Power Plant Power	Tin Whiskers	Diode (Axial Leads)
+	2005 OPTUS B1 Space	Tin Whiskers	Relays
	2005 Telecom Equipment Telecom	Tin Whiskers	RF Enclosure
*	2006 GALAXY IIIR (Side 2) Space	Tin Whiskers	Relays

From Jay Brusse & Henning Leidecker(NASA)

(商用衛星:業再起不能故障 🔸機能継続)

K.Suganuma, Osaka University



Snウィスカの発生メカニズムは?





室温ウィスカ成長



Snめっき微細構造制御とウィスカ



なぜ鉛添加がウィスカを抑制するか?



熱処理によるウィスカ抑制効果

めっき直後



12

K.Suganuma, Osaka University

2種類のCu基材のウィスカ成長



T. Kato, 他; Tin Whisker Workshop, Reno, NV, May 29, 2007



電解マットSn(10 µm厚)

化合物形成形態に差 →応力に差

SnCu-CUCR (Age: 163 days) 144.2 X direction -19 MPa 144.2 144.0 0.0 0.2 143.8 0.0 0.2 143.8 0.0 0.1 0.





アルミ電解コンで発生するウィスカと抑制策







洗浄でウィスカ 抑制

14





溶接部位の複雑なIMC形成 でウィスカ発生



JEITA





真空中ではウィスカ成長が細く長い



500 cycles





全体

ウィスカ表面の"年輪"の形成

直空





SEI

4.0 µm

✓微細な年輪形成 ✓真空中が成長速い ✓先端部が速く、根本 ほど遅い成長

先端部

根本部

1500 cycles K.Suganuma, Osaka University

ISIR

SEI X20,000 K. Suganuma, et als, Acta Mater, 51(2011), 7255.



ウィスカの根本に溝形成

ウィスカ根本の粒界グルーブ先端の SnO層割れ: "A" & "B"

ウィスカ成長に伴い粒界割れが伸展し、SnO膜が形成され、割れ安定化:応力腐食の様相

ウィスカグルーブ内の厚いSnO膜が、 ウィスカ成長時に摩擦を引き起こ す

ねじ曲がったウィスカ成長

K. Suganuma, et als, Acta Mater, 51(2011), 7255.



After 2000 cycles in low vacuum K.Suganuma, Osaka University



酸化により成長するウィスカ



- 表面・粒界の酸化により体積膨張で圧縮応力が
- 酸化が進行するための潜伏期間がある
- ・42アロイは腐食が早い→ガルバニック腐食
- フラックスの活性度が影響する
- ・ はんだ付け雰囲気が影響する





Det WD Apptech

50 un

ノフォーマルコートの温度サイクルウィスカ抑制効果

100



中川 剛,他; 電子情報通信学会論文誌, J95-C[11](2012), 343.



19

Whisker length (µm) 35 未処理 30 25 20 15 10 5 B 0 200 400 600 800 1000 1200 0 No. of test cycles

vacuum TypeC vacuum TypeA ▲ vacuum TypeB vacuum Uncoated ♦ air TypeA ∆ air TypeB air TypeC o air Uncoated -40~125°C ISIR

K.Suganuma, Osaka University

エレクトロマイグレーション(EM)

<u>メカニズム</u>

- ・ 強い電子の流れにより原子の拡散が促進(electron wind force)
- 一方向拡散が生じ、ボイド、亀裂、ヒロック、 UBM消失、著しいIMC成長が生じる
- Sn中の異常なCuの拡散



Sn-Ag-Cu solder bump (15kA/cm², 160°C, 100 h) *Kiju Lee, et als, J. Mater. Res., 26, 3 (2011)*

EMメカニズム





エレクトロマイグレーション Sn-Ag-Cuフリップチップ接続のEM劣化





In添加によるEM寿命改善

(a) Pure Sn



Cu 🔥 Sn High angle grain boundary Sn Ø Sn Sn 50 um (d) Sn-16In 50 um - Inverse pole figure Max Sn[001] 110 20° 90°

(b) Sn-4In

Sn結晶粒の微細化効果

001



100

これからの市場は超耐熱接続技術が必須



次世代パワーデバイス実装

✓基礎科学:界面反応、極限環境劣化現象の解明
 温度、酸化、ストレス、大電流…etc

✓設計応用:新材料提案、応力緩和構造設計

CAE(ストレス、熱、大電流)、状態図計算…etc

✓シミュレーション&実証:モデル試作 → 実証評価
 組織評価(TEM、EBSP)、状態評価(XPS)、熱伝導 ◆ 兆/熱
 EM、欠陥評価、寿命評価(ブラック経験式?、ワイブル統計?)...etc



SiC/GaNパワーIGBTの課題

ワイヤボンド接続部破壊

- ✓ -50℃から300℃の厳しい温度サイ クルに耐える接合構造
- ✓ 300℃大気中に耐える耐酸化性と
 界面設計
- ✓ ウィスカ耐性・極低温耐性
- ✓ 超高温大電流下のEM劣化メカニ ズム解明と耐える構造設計

光/熱

DBCに可能な素材組み合わせ

SiC、GaN、Si単結晶と

- 絶縁基板 : Al₂O₃, AlN, Si₃N₄....
- 金属層 : Cu, Al, Ag, Au, Zn, W, Mo, Nb.



セラミックスと金属の接合研究実用化は進んでいる

◆ 1980年まで、熱力学と界面反応研究



Al₂O₃基板上薄膜電極形成が実用化

- 1930年代 Telefunken法(Siemens)
- 1972年 Direct Bond Copper法(GE)



◆ 1980年~非酸化物系セラミックスへの期待: 産学挙げてのセラミックス・フィーバー

目標:Si₃N₄、SiCの自動車エンジン部品 ⇒ 接合技術が鍵



FEMを初めて導入

世界初のSi₃N₄接合に成功



◆ 1986年 日本メーカーが世界初のSi₃N₄ターボチャージャーを 実用化



ISIR

DBC基板界面の劣化

✓ 温度サイクルによるストレス

✓ 酸化による界面劣化



エッジ処理でDBCの応力緩和







Effect of Dimples on Temperature Cycle Resistance



28



界面構造観察から生まれたDBA技術





1998年 世界初ハイブリッド車に搭載





応力緩和は金属中間層制御





軟金属/低膨張金属積層中間層





K.Suganuma, et. Al, Annual Review of Materials Science, 18 (1988), 47

X.S.Ning, et al, Mat.Res.Soc.Symp.Proc., vol.445 (1997), 101

ゼロストレス構造のために

基本的考え方 ✓ SiC, GaNダイに掛かるストレスを極限まで減らす

- ✓ 放熱を最大限に生かす
- ✓ 動作時のストレスを緩和する

具体的方策

- → 無加圧実装
- → 低温実装
- → 他の部材がストレスを受け持つ構造:ソフトな接合層、低膨張金属層配置、 DBC/DBAのセラミックスの膨張係数を低膨張に
- → 高熱伝導・高熱伝達材料、構造を作る



金属の代表的物性値

	電気抵抗	熱伝導率	融点	線膨張率	
	(x10⁻6Ωcm)	(W/m·K)	(ºC)	(ppm)	
Ag	1.6	419	951	19.1	
Au	2.3	290	1063	14.1	
Pt	10.6	71	1769	9.0	
Cu	1.67	394	1083	17.0	
AI	2.69	240	660	23	8.5
Sn	12.8	65	232	23.5	-
Zn	5.9	116	420	26.3	a軸:15.0 c軸:53.0
ICA	~50	~5			

高温はんだの選択肢

✓ 高鉛はんだ :信頼性低い、耐熱温度が低い(150℃以上は不可)、鉛法 規制がいずれ始まる

✓ 金はんだ :耐熱温度が低い(280℃で溶ける)、極めて高価、硬い

✓ Sn-Sb系はんだ:5%迄は疲労に強い、融点~242℃で低すぎる

✓ TLP接合: Cu-Sn系の反応利用、Ag-In膜の反応利用、ボイド、IMC脆さ

✓ Zn-Snはんだ : 200℃まで信頼性高、耐熱温度が低い(200℃で液相)
 ✓ 純Znはんだ : 優れた耐熱特性、接合温度が高い(450℃)
 ✓ 組上 (性えせん 加圧が必須、温度が200℃の以上、会せれに支援

✓ 銀ナノ粒子接合:加圧が必須、温度が300℃以上、金並みに高価

✓ 銀焼結接合
 :最も可能性が高い、ミクロポア応力緩和、低圧、大気
 ✓ 金属膜接合
 :新技術、低圧、大気、ボイドレス

純ZnによるSiCの超耐熱ダイアタッチ



K.Suganuma, Osaka University

ISIR

接合温度違いが影響するSiCダイ熱変形



Au-In系積層膜でTLP接合されたSiCダイ







ハイブリッドAgペーストによる焼結接合

温度: 200-250°C、雰囲気:大気、圧力:低圧



- ✓ 低い電気抵抗 ≈6x10⁻⁶Ω·cm
- ✓ 高い接合強度 > 30 MPa
- ✓ 高い熱伝導度 > 140 W/mK
- ✓ 優れた耐熱衝撃:-50 ~ 300 ℃

低温、低圧、大気中、銀めっき



熱抵抗比較











ISIR

SiC粒子添加による粒成長抑制









K.Suganuma, Osaka University

新Agハイブリッドペースト



42

新技術:Ag膜直接接合







Ag膜のストレスマイグレーションを利用した接合



ISIR

A.Sugunumu, Osaka Onivers

C. Oh, et al, Appl.Phys.Letters, 104(2014), 161603.

スパッタ温度の影響 T_s



C.M.Oh, et al: J Mater Sci: Mater Electron (2015) 26:2525

温度の影響





ISIR



C.M.Oh, et al: J Mater Sci: Mater Electron (2015) 26:2525

K.Suganuma, Osaka University

フリップチップへの応用



接合界面組織

- 無加圧

- 250 °C

- 大気

- 1h









49

ワイドギャップパワー半導体ダイアタッチ選択肢

- はんだ接続(Au系、純Zn系)
- 液層拡散接合(TLP)
- 焼結接合(Ag、Cu)
- ストレスマイグレーション接合(Ag膜)

接合メカニズムの基礎理解が必要

共通の指針、新たな評価技術が必要

高付加価値化実装のまとめ

- ✓ 進む微細化や極限環境への要求が高まる。
- ✓ ソフトな実装は、ウェアラブルで急展開が始まった。
- ✓ ウィスカはメカニズムがかなり解明された。各種環境での対策が要求される。
- ✓ エレクトロマイグレーションは、微細接続部位から高負荷デバイスまで重要な課題。
- ✓ 200°C超耐熱実装が、WBGの実用化には必須。材料・プロセスの提案は ほぼ揃ったが、信頼性と現実性は現在評価が進行中。材料・構造設計 や評価技術はまだ不十分。



ISIR

51





suganuma@sanken.osaka-u.ac.jp

http://www.eco.sanken.osaka-u.ac.jp/pe/

謝 辞 Ag焼結接合及びストレスマイグレーション接合は、科研費(S)の補助の元に遂行している。

52