自己伝播発熱素材を用いた瞬間はんだ接合技術

生津 資大*

Reactive Soldering Technique Using Self-Propagating Exothermic Material

Takahiro NAMAZU*

* 兵庫県立大学 (〒671-2201 兵庫県姫路市書写 2167)

* University of Hyogo (2167 Shosha, Himeji, Hyogo 671-2201)

1. はじめに

ナノのサイズを持つ材料は、バルクでは見られなかった新たな機能や現象を発現することが多い。例えば、マイクロ～ナノサイズに成形した単結晶 Si は 100～300°C 程度で塑性変形現象を示す（一般的にはバルク単結晶 Si は 600°C 以上で塑性変形することが知られている）ことなどが相当する¹⁾。このようなマイクロ～ナノ材料特有の現象は学術的に大変興味深く、多くの研究者がサイズ効果の完全解明を目指している。また、サイズ効果現象は単に学術的に面白いだけでなく、新たな製品を創出するきっかけとなり得ることもある。著者らはこれまで軽金属と遷移金属を数十 nm ずつ積層堆積させた金属多層膜が自己伝播発熱反応[†]を示すことを見出し、その瞬間的な発熱特性を利用して Si ウェハを 0.1 秒未満に瞬間はんだ接合する技術を開発してきた。この技術を使うと限られた領域のみを極短時間で接合できるため、耐熱性の低い電子デバイスや MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) デバイスの封止実装に有用と期待できる。

本報では、まず、Al/Ni 多層膜を用いて自己伝播発熱反応について概説する。次に、Al/Ni 多層膜の成膜条件と発熱特性の関係を記した後、これまで実施したはんだ接合応

用研究の成果の一部と技術課題を紹介する。

2. 自己伝播発熱多層膜

軽金属と遷移金属をナノの厚みで積層堆積させた金属多層膜は、自己伝播発熱反応を示す。この多層膜に外部から極微小エネルギーを与えると、2つの金属による化合物生成と同時に橙色の閃光を発しながら発熱する（図 1）。局所的な化合物生成反応で生じた熱が次の反応誘起のためのエネルギーとして使われるため、この発熱反応は多層膜内を 10 m/s 程度で高速自己伝播する²⁾。

図 2 より、バイレイヤー厚 20～100 nm、総膜厚 20 μm の Al/Ni 多層膜はいずれも発熱反応を示し、発熱ピーク的位置と数はバイレイヤー厚で異なることがわかる。例えば、バイレイヤー厚 100 nm の Al/Ni 多層膜では 3つの発熱ピークが見られ、温度が低い方から 524 K、590 K、675 K でそれぞれ Ni_2Al_9 、 NiAl_3 、 NiAl の金属間化合物が生成した。このグラフの横軸を時間に置き換え、発熱ピークの面積を算出すると、図 3 に示すように単位質量当たりの反応熱量が得られる。反応熱量は 2 種の金属の組み合わせ、バイレイヤー厚、総膜厚などで決まり、スパッタ成膜したバイレイヤー厚 100 nm、総膜厚 40 μm の Al/Ni 多層膜（原子比 1:1）の場合、約 1,200 J/g の熱量を放出する。バイレイヤーが薄く

図 1. Al/Ni 自己伝播発熱多層膜の反応の様子

図 2. Al/Ni スパッタ多層膜の示差走査熱量計測結果の一例

図3. Al/Ni スパッタ多層膜における単位質量あたりの反応熱量のバイレイヤー厚依存性

なると単位質量当たりの発熱量が減少する原因は、多層膜にはAl層とNi層の間にミキシング層と呼ばれる混合層が存在することと関係する。ミキシング層は発熱反応しないことから、バイレイヤー厚低下とともにミキシング層の割合が増え、結果として図3のような傾向が得られる。また、Al/Ni 多層膜（原子比 1:1、バイレイヤー厚 100 nm、総膜厚 40 μm）を短冊状のカプトンテープ上に成膜し、一端に電気刺激を与えて反応を誘起させ、他端への反応伝播時の温度を赤外線放射温度計で計測すると、0.1 秒で 1,000°C 近くまで瞬間発熱する。最高温度到達の数秒後には室温まで低下するため、この発熱素材を用いると、熱を与えたい箇所のみを瞬時に加熱できる。自己伝播発熱反応は酸化還元反応ではないために反応雰囲気を選ばず、真空中、不活性ガス中、水中でも大気中と同様に反応する。加えてアウトガスがないゼロエミッション材料でもあり、環境面でも優位性がある。

3. MEMS 封止実装への応用の利点

著者らは上記のような面白い特長を持つ発熱多層膜をはんだの溶融熱源として用い、MEMS デバイスの封止実装のための瞬間はんだ接合法を開発してきた。近年の半導体加工技術やボトムアップ加工技術の飛躍的進歩の恩恵を受け、多種多様な MEMS デバイスが実用されている。電子デバイスと MEMS デバイスの違いは、前者が電気信号の授受のみで何らかの仕事をするデバイスであるのに対し、後者は機械的に動く“可動部”を持つことにある。この違いは、MEMS の実装には電子デバイス実装に一般的に用いられる樹脂封止などの技術をそのまま適用できず、パッケージと呼ばれる“箱”の中に収納する必要性が生じることを示している。接合法には幾つかの方法があるが、比較的低温プロセスであるはんだ接合を MEMS 封止パッケージに用いる場合、はんだを溶融させるために、図4に示すようにデバイスを内部に収納した状態で全体を電気炉加熱する方法か、はんだ近傍にヒーター回路を設けてジュール加熱する方法のいずれかが用いられる。いずれの方法でもデバイ

図4. 瞬間はんだ接合を用いた MEMS 封止パッケージの模式図

スをパッケージ内部に収納した状態で比較的長時間加熱することとなり、異種材料の積層構造を多く持つ MEMS に熱損傷が及ぶ可能性が高いことが問題である。

この技術課題に対し、著者らが提案する自己伝播発熱多層膜を熱源としたはんだ接合でははんだのみを局所的かつ瞬時に加熱できるため、パッケージ内部のデバイスの熱損傷を大幅に低減できる可能性が高い。加えてリフロー不要でアウトガスゼロの省エネ・低エミッションプロセスであり、実用化されれば環境面への好影響も期待できる。

4. 瞬間はんだ接合技術の問題点

Al/Ni 多層膜を熱源としたはんだ接合 MEMS パッケージの作製に際し、まず、2 枚の Si チップの瞬間はんだ接合を行った。Sn-3.5Ag はんだを成膜した 2 枚の Si チップの片方に Al/Ni 多層膜（原子比 1:1、バイレイヤー厚 100 nm、膜厚 30 μm）を成膜し、重ねた状態で上方から加圧して真空中で電気刺激を Al/Ni 多層膜に与えた（図5）。その結果、Si チップを瞬時にはんだ接合することに成功した。しかし、接合チップを X 線透過観察した結果、図6のように反応開始点から放射状にクラックが存在していた³⁾。クラック形成は、Al/Ni 多層膜が NiAl 化合物に変化する際の体積収縮と関係している。Al/Ni 多層膜に刺激を与えると、化合物生成反応により結晶構造が面心立方格子 (FCC) から体心立方格子 (BCC) に変化すると同時に格子面間隔が約半分になる。これより反応後の体積は反応前から約 12% 減少し、この体積収縮がクラック発生のも要因と考えられる。Al/Ni 多層膜の厚みの微妙な変化や膜内の欠陥、組成ムラなどにより、場所によって反応伝播速度が若干異なる。伝播速度が速い部分は体積収縮を伴いながら反応が優先的に進み、結果として反応伝播が遅い部分にクラックができたものと推測できる。これに基づくと、複数点から同時に反応を誘起した場合、反応同士が衝突するところに大きなクラックが形成されると予想できる。自作のマルチプローブ反応誘起システムで複数点同時反応させた結果、図7のようにほぼ予想通りの箇所にクラックを導入することができた⁴⁾。封止パッケージを視野に入れ、キャビティを持つ Si

チップに対しても複数点同時反応させた結果、同様に反応が衝突するところに大きなクラックが形成された⁴⁾。これは反応開始位置と数でクラックの位置と向きを制御可能なことを示唆しており、仮にダイシングライン上にのみ上手くクラックを導入できれば、ダイシング後のチップ接合部はクラックフリー化するものと期待できる。クラックができて溶融したはんだが瞬間的に流れ込むため、接合部にはクラックに基づく空間が存在しない。

図 5. 自己伝播発熱多層膜を用いた瞬間はんだ接合の様子

図 6. はんだ接合した Si チップの透過観察写真例

しかし、半導体デバイスの接合ではクラックができるという事実そのものが敬遠される。NiAl 化合物内部のクラックフリー化を目指し、著者らは Al/Ni 多層膜の線幅、厚み、はんだ膜厚を変化させて接合した。その結果、Al/Ni 多層膜の膜厚はクラック形成と無関係であったが、接合部線幅が細く、かつ、はんだが薄すぎない場合、導入されたクラックは少なかった (図 8)。この理由は、線幅が細いほど約 12% の体積収縮で生じる変形量が小さくなり、はんだが厚いほどその変形量をはんだが吸収しやすく、反応時の Al/Ni の変形が容易になったためである。しかし、はんだ厚が $8\mu\text{m}$ 以上では Al/Ni 層の体積収縮時に面内方向だけでなく面外方向にも変形し、接合後の NiAl 化合物層は面外方向に周期的に湾曲していた。加えて NiAl 内部には面外変形によってもたらされたと思われるボイドが多数確認された。はんだ層が厚くなるとクラックは抑制されるが NiAl の変形とボイドが見られ、これらは接合部の機械信頼性低下をもたらすため避けなければならない。クラックやボイドができず、NiAl が変形しない最適条件を見出すことが重要である。

図 7. クラック導入実験の一例

図 8. はんだの厚みと接合面積が NiAl 中のクラックおよびその変形に及ぼす影響の模式図

図 9. 四点曲げ試験片作製方法と試験結果の一例

5. 接合強度評価

はんだ接合を封止構造に使う場合、機械的強度と封止性の確保は重要である。著者らは瞬間はんだ接合した Si チップの接合部をダイシングカットして中央に接合箇所を含む棒状の試験片を準備し、四点曲げ試験を行って破壊起点の特定と最適接合条件を調べた（図 9）。その結果、Al/Ni 多層膜が分厚く、はんだと Si の間に Ni/Cr の下地膜を挟むと強度が上昇する傾向にあった^{5),6)}。この試験片ははんだ内部の溶融部と未溶融部の界面が破壊起点であったが、下地膜が Ni のみの試験片ははんだと Si との境界で破壊した⁷⁾。NiAl 化合物で壊れた試験片はなく、反応後の NiAl 化合物は機械信頼性に優れることを確認した。

6. 2 インチ Si ウェハを用いた封止パッケージ作製の試み

MEMS 封止パッケージに適用することを想定し、デバイス収納部を想定したキャビティを複数含む 2 インチ Si ウェハの瞬間はんだ接合を真空中で試みた。図 10 に接合前後のウェハ表面の写真を示す。この写真は格子状の光をウェハ表面に照射し、大気中で撮影したものである。接合前のウェハ表面のラインパターンは直線であり、ウェハ表面が平滑なことを示している。一方、接合後のパターンは曲線であり、表面に凹凸があることを示唆している。つまり、キャビティ内外の圧力差でメンブレンにたわみが生じた、

図 10. ダイアフラム構造を含む 2 インチ Si ウェハの瞬間はんだ接合結果の一例

すなわち、キャビティ個々の真空封止が実現できたことを表している。近い将来、瞬間はんだ接合技術が実用されることを期待する。

7. おわりに

Al/Ni スパッタ発熱多層膜を用いてはんだを局所的かつ瞬時に溶融させ、Si ウェハをはんだ接合する技術を概説した。接合部のクラックフリー化の実現可能性を示唆するとともに接合強度ならびに封止性能が実用に耐えうる可能性があることを実験的に確認した。近い将来、微小可動部を持つ MEMS デバイスの封止パッケージ用はんだ接合法として実用され、世界規模で省エネ・低エミッション化が進むことを期待する。

(2015.9.10- 受理)

文 献

- 1) T. Namazu, Y. Isono, and T. Tanaka: "Plastic Deformation of Nanometric Single Crystal Silicon Wire in AFM Bending Test at Intermediate Temperatures," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. **11**, No. 2, pp. 125–135, 2002
- 2) T. Namazu, H. Takemoto, H. Fujita, Y. Nagai, and S. Inoue: "Self-Propagating Explosive Reactions in Nanostructured Al/Ni Multilayer Films as A Localized Heat Process Technique for MEMS," *Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Microelectromechanical Systems, MEMS 2006, Istanbul*, pp. 286–289, 2006
- 3) T. Namazu and S. Inoue: "Al/Ni Self-Propagating Exothermic Film for MEMS Application," *Materials Science Forum*, Vols. **638–642**, pp. 2142–2147, 2010
- 4) T. Namazu, K. Ohtani, K. Yoshiki, and S. Inoue: "Crack Propagation Direction Control of Crack-Less Solder Bonding

- Using AlNi Flash Heating Technique,” Proceedings of the 16th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducers 2011, Beijing, pp. 1368–1371, 2011
- 5) K. Ohtani, Y. Yamano, T. Namazu, and S. Inoue: “Strength Evaluation of Lead-Free-Solder Joint Fabricated by Exothermic Film Local Heating,” Proceedings of the 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducers 2009, Denver, pp. 172–175, 2009
- 6) T. Namazu and S. Inoue: “Al/Ni Self-Propagating Exothermic Film for MEMS Application,” Materials Science Forum, Vols. **638–642**, pp. 2142–2147, 2010
- 7) T. Namazu, K. Ohtani, S. Inoue, and S. Miyake: “Influences of Exothermic Reactive Layer and Metal Interlayer on Fracture Behavior of Reactively-Bonded Solder Joints,” Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. **137**, No. 3, 031011 (7 pages), 2015

† 用語解説

自己伝播発熱反応：2種類の異なる金属から成る多層金属膜が化合物を形成する際に膜内を自己伝播しながら

生じる発熱反応を指す。軽金属と遷移金属を数 nm ～ 数十 nm の厚みで積層堆積させた多層金属膜の一部に外部から微小刺激（例えば電気刺激やスパークなど）を与えると、その部分で化合物が生成して発熱する。局所的に生じた熱が周囲の反応を誘発するエネルギーとして働くため、化合物生成に伴う発熱反応が膜内を自己伝播する。熱量や速度は2つの金属の組み合わせ、バイレイヤー厚（1層ずつの厚み）、総膜厚などによって決定される。代表的な自己伝播発熱多層膜には、Al/Ni、Ti/Al、Ti/Si などがある。

著者紹介

生津資大（なまづ たかひろ）

兵庫県立大学大学院工学研究科機械工学専攻 准教授

2002年3月、立命館大学大学院理工学研究科にて博士（工学）取得後、同年4月に兵庫県立大学大学院工学研究科の助手、2007年4月に同准教授（現職）。2010年10月より3年半、JST さきがけ研究員を兼任。ナノ材料を対象としたMEMS 援用力学物性計測技術開発と自己伝播発熱素材の基礎・応用研究を推進。

namazu@eng.u-hyogo.ac.jp

<http://www.eng.u-hyogo.ac.jp/mse/mse12/index.html>