

# 表面活性化接合と テンプレートストリッピングを 組み合わせた接合面の平滑化技術

Planarization of Bonding Surfaces based on Template Stripping  
and Surface Activated Bonding Techniques

竹内 魁  
Kai Takeuchi

東北大学大学院工学研究科電子工学専攻 准教授  
Department of Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University (Associate Professor)

日暮 栄治  
Eiji Higurashi

東北大学大学院工学研究科電子工学専攻 教授  
Department of Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University (Professor)

KEYWORD ▶ 実装 常温接合 めっき

受理日:2026年5月19日

## はじめに

01

電子デバイスの実装工程において、接合技術は重要な要素技術であり、機械的接続、電気的接続、放熱、封止といった種々の要求に応じながら接合界面を構成する必要がある。接合手法の中でも、金(Au)を介した接合技術は、Auの低い電気抵抗、高い熱伝導率、高い耐食性などから広く用いられる。また、比較的小さなヤング率や他の金属のように自然酸化膜を形成しないため、Au同士の接合界面での密着や拡散が得やすい。これにより、たとえばAlやCuなどの金属材料の接合と比較すると<sup>1)</sup>Auは低温低荷重で直接接合を得ることができる。

中でも、Auめっきはボンディングパッドやボンディングフレームなど、さまざまな形状・構造の接合面に広く利用されている<sup>2-5)</sup>。しかし、従来のAuめっきの熱圧着接合では、接合界面においてAu原子を拡散させるために250℃を超える加熱が必要となる。特に、異種材料、異種デバイス、異種構造、ないしは脆性材料などの集積においては、高温プロセスによる熱ダメージや熱膨張係

数の差による残留熱応力が、デバイスの信頼性や性能に直結するため、低温あるいは室温プロセスでの接合技術が高機能デバイス実装の鍵となる。

室温プロセスでの接合技術の代表的な手法の一つが、表面活性化接合である。この標準的なプロセスでは、図1に示すように、物理エッチングにより吸着物や汚染物質を除去し、接合面を活性化する。活性化された接合面は表面自由エネルギーが高く、接触させるだけで金属結合などの原子レベルの結合を形成するため、加熱を必要とせず常温で接合を達成する技術である。特にAu材料の表面活性化接合は広く研究されており、Ar原子ビームやプラズマを用いたAu接合層の表面活性化接合では、ウェーハレベルの大面積、室温工程、大気中、無加圧といった条件でも、接合界面で強固なAu-Au金属結合を形成し、母材破壊レベルの高い接合強度を示す<sup>6-10)</sup>。したがって、表面活性化接合は室温での直接Au接合を実現するための有力なアプローチといえる。

表面活性化技術はAuの低温/室温接合に欠かせないが、低温接合にはもう一つ重要な要素がある。それが接合面の平滑性である。表面活性化接合に代表される低温/室温接合では、接合界

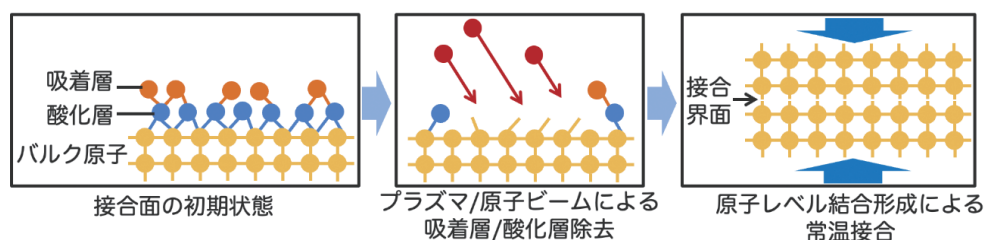


図1 表面活性化接合のプロセス

面で結合を形成しながら密着を得るために、原子レベルで平滑な接合面が必要である。表面粗さが大きいと、接合界面の微小な空隙を埋めるためにより大きな変形エネルギーが必要となるためである。特に低温や室温での接合では、表面粗さが10 nm以下の平滑な接合面が求められる<sup>11-13)</sup>。一般に、低温接合のための接合面の平滑化には、化学機械研磨(Cheical Mechanical Polishing: CMP)が用いられる。しかし、CMPは主にウェーハに適用される技術であり、チップやパターン構造を持つ試料には適用が難しく、化学的に不活性なAuに対しては適用がさらに困難である。そのため、研磨を用いない新たな平滑化手法が必要である。本稿では、従来の研磨技術を必要としない新たな平滑化技術と得られた平滑面を活用した常温接合とその応用について解説する。

## テンプレートストリッピングによる平滑化技術

02

平滑な薄膜を得る手法として、テンプレートストリッピング(Template stripping)と呼ばれる手法が開発されている。テンプレートストリッピングとは、平滑なテンプレート上に堆積させた金属膜をテンプレートから剥離することで、テンプレート表面と同等に平滑な面を得る手法である<sup>14, 15)</sup>。著者らは、この手法と表面活性化接合を組み合わせることで、研磨のような除去加工ではなく、転写による付加加工に基づき、粗い接合面を平滑化する技術を開発した<sup>16-18)</sup>。表面活性化とテンプレートストリッピングによる平滑化プロセスは、標準的には図2のような工程となる。

まず、テンプレート上に、Au薄膜をスパッタリングにより成膜する。基本的にテンプレート表面の形状が、転写後の金属薄膜の表面形状と一致するため、テンプレートは平滑な表面を持つ必要がある。テンプレートに成膜するAuの膜厚は典型的には100 nm程度である。Au薄膜を持つテンプレートと、平滑化を行う試料の両方をArプラズマ処理によって表面活性化する。これは主として表面吸着物の除去を狙うものである。その後、活性化した2つの面を接触させ、大気中で接合する。当然、平滑化を狙う面

の表面粗さは大きいので、室温では接合できない。ここでは150℃程度まで加熱することで、テンプレート上のAu薄膜とAuめっき膜を接合する。通常の熱拡散接合では先述のように250℃以上の加熱が必要であるが、表面活性化を行うことで150℃の加熱でも粗い膜との接合が可能となる。こうして接合したのちに、テンプレート基板を剥離させると、Au薄膜だけがAuめっき膜上に転写される。この表面は、テンプレート基板の表面を反映し、平滑な面となり、さらにこの転写プロセスを複数回行うことで、より平滑化効果を高めることができる。

テンプレート基板には、平滑性ととともに、Au薄膜との剥離性、つまり弱い密着力が求められ、熱酸化膜を持つSi基板や、ポリイミド(PI)フィルムなどを標準的に用いる。Auめっきのような粗い表面を平滑化する場合、転写されたAu膜が表面の凹凸を完全に埋めず、元の粗い表面と転写膜の間にギャップが生じる可能性がある。このようなギャップは、熱酸化膜を持つSi基板のような剛性の高いテンプレート基板を用いて、粗い接合表面を平滑化した場合によく確認される<sup>18)</sup>。一方で、PIフィルムをテンプレートとして用いる場合には、ヤング率の低いPIが平滑化対象面の凹凸を埋めるように変形するため、Auめっきと転写膜の間のギャップを埋める効果が期待される。本稿では、PIテンプレートを用いる平滑化技術に焦点を当てる。

図3にPIテンプレートを用いて平滑化したAuめっき膜表面の走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)像を示す。平滑化前には、Auめっきにより形成される凹凸が確認されるが、3回Au薄膜を転写したのちにはこれらの形状は確認

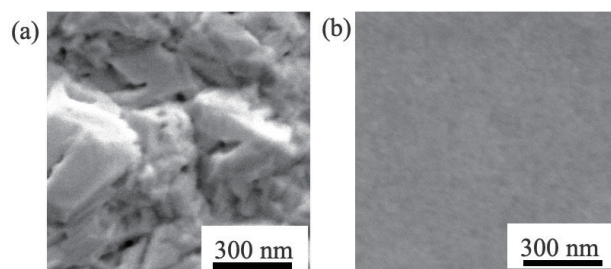


図3 (a)平滑化前と(b)Au薄膜を3回転写し平滑化したAuめっき膜のSEM

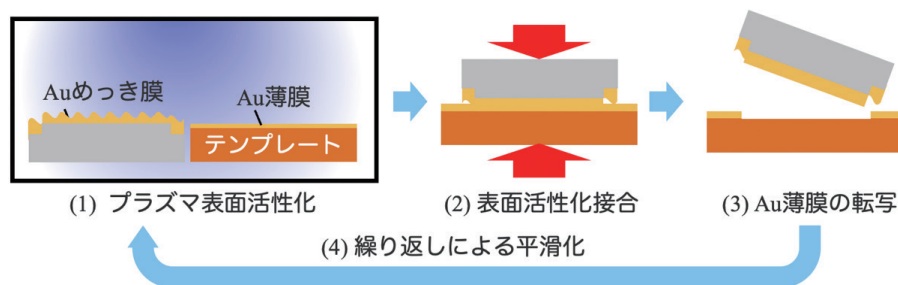


図2 表面活性化接合とテンプレートストリッピング技術を用いる平滑化プロセス

されない。つまり、もともとの表面粗さを埋めながら、Au薄膜がめっき表面を覆っていき、表面を平滑化していることがわかる。

また図4には、転写前後のAuめっき膜の断面SEM像を示す。図3の表面観察と同様に、めっき膜の表面の凹凸が、転写膜によって埋められ平滑化される様子がわかる。また、表面の凹凸が大きい箇所については、Au転写膜が完全に凹凸に追従せずに、わずかに空隙として残留することがわかる。一方で、この空隙は、例えば熱酸化膜付きSi基板のようなテンプレートを用いるとさらに大きくなることもわかっており、テンプレート基板には平滑性だけでなく、平滑化対象の表面形状に適する機械特性が求められることがわかってきている。この場合では、PIテンプレートを用いることで、空隙の発生を抑制しながら平滑化が実証された。

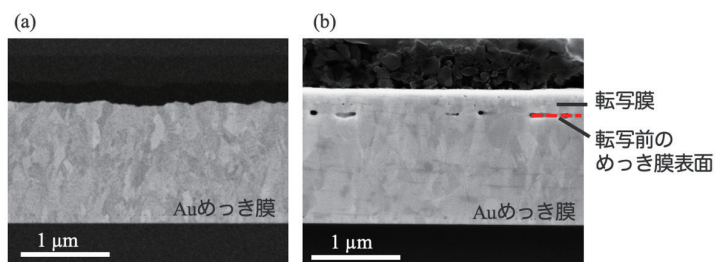


図4 (a) 平滑化前と (b) Au薄膜を3回転写し平滑化したAuめっき膜の断面SEM像

この時の原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy: AFM) で測定した表面粗さRMS (Root Mean Square)を図5に示す。未処理のAuめっき膜はRMS 22 nm程度 (AFM走査範囲 10 μm角) であるが、Au薄膜の転写により表面粗さは減少していき、3回転写後にはRMS 6 nm程度まで低下することがわかる。これは、もともとのAuめっき膜上のマイクロな凹凸がまず平滑化され、転写を繰り返すとより大きなサイズの凹凸が平滑化されることで、徐々に表面粗さが減少するためである。加えて、PIテンプレートで平滑化したのちに熱酸化膜テンプレートを用いて平滑化すると、空隙を抑制しつつ、RMS 1 nm程度まで平滑化可能である<sup>17)</sup>。

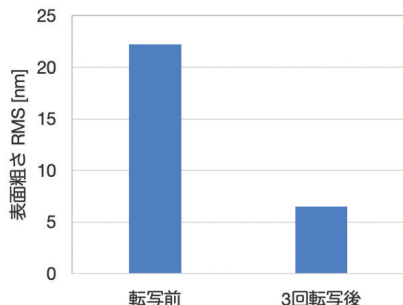


図5 転写前後のAuめっき膜の表面粗さ

次に、平滑化前後でAuめっき膜を常温接合して得られる接合強度を図6に示す。接合相手にはAu薄膜を成膜したSiチップ (RMS 0.4 nm) を用いて、表面活性化後に室温で接合し、評価

したものである。転写前、つまり平滑化前のAuめっき膜は、上述のように表面粗さが大きく、150 °C程度の熱をかけることで転写接合は可能であるが、室温では接合には至らない。一方で、Au薄膜の転写によって平滑化されると、もともと粗いめっき膜であっても常温接合が可能となり、23 MPa程度の接合強度という母材破壊強度を示す。平滑化によって強固な常温接合が可能となることがわかる。

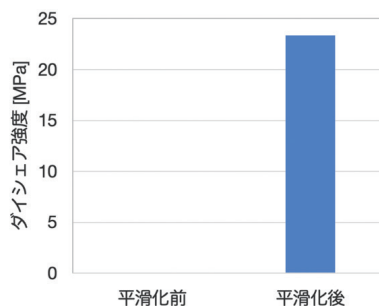


図6 平滑化前後のAuめっき膜の常温接合強度

表面活性化接合とテンプレートストリッピングを用いる平滑化手法は、バンプのようなパターンをもつ接合面にも適用可能である。図7に示すのは、径100 μmのAuめっきバンプにAu薄膜を転写し平滑化した試料のSEM観察像である。パターンのないAuめっき膜と同様に、転写前にはめっき由来の表面の凹凸が確認されるが、Au薄膜を同様のプロセスで1回転写すると、凹凸が覆われ平滑化される様子がわかる。これは、テンプレート側のAu薄膜がバンプパターンの形状だけ転写されたことを意味する。このことから、Auめっきバンプのように平滑化対象の表面にパターンがあっても、接合面だけに選択的にAu薄膜を転写し平滑化が可能であることを実証した。

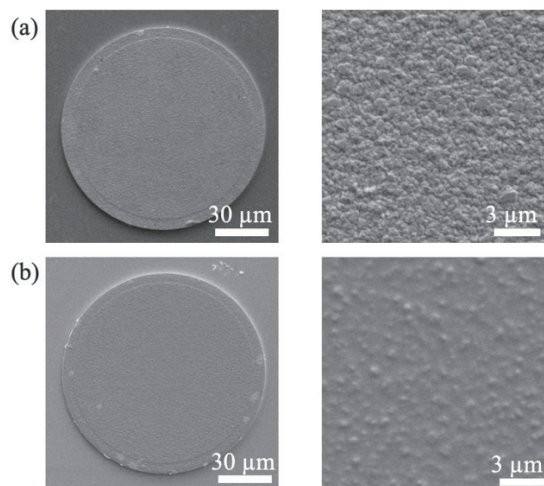


図7 (a) Au薄膜転写前と (b) 転写後のAuめっきバンプ表面のSEM観察像 (左) とその表面拡大像 (右)

また、この際の表面粗さを見てみると、図8のようにパターンのない場合と同様に転写を繰り返すことで表面粗さが低減することがわかる。平滑化前にはRMS 30 nm程度を持っていたAuめっきバンプ表面は、3回転写後にはRMS 7 nm程度まで平滑化される。さらに、これをAu薄膜へ常温接合すると、図9のように、平滑化前には2.3 MPa程度だった接合強度が3回転写による平滑後には7.3 MPa程度まで上昇する。一般にバンプを介した接合は、バンプの塑性変形を伴うことで密着性を高めるが、平滑化はさらに密着性を高め、室温プロセスであっても接合強度の上昇に寄与することがわかる<sup>19)</sup>。

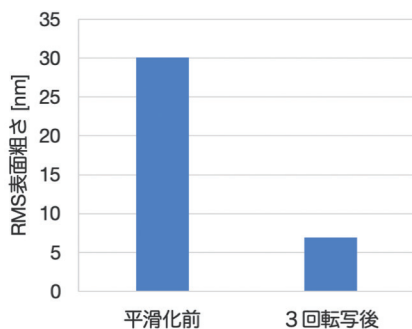


図8 転写前後のAuめっきバンプの表面粗さ

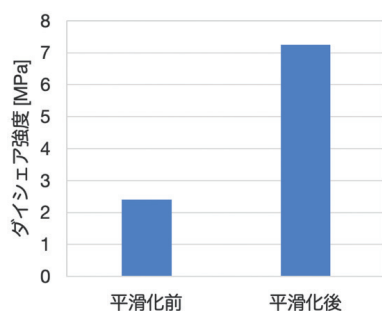


図9 平滑化前後のAuめっきバンプの常温接合強度

## おわりに

## 03

本稿では、室温接合に向けたPIテンプレートストリッピングによるAuめっきの平滑化手法と、これによる常温接合を紹介した。PIテンプレートを用いたテンプレートストリッピングにより、Au薄膜をAuめっき表面に繰り返し転写することで、めっき膜表面の表面粗さRMSは22 nmから約6 nmまで低減された。平滑化されたAuめっきは、室温において平滑なAu膜と高い接合強度で接合することが可能となり、母材破壊を示す強固な接合強度が得られた。さらに、この手法はAuめっきバンプのようなパターンをもつ接合面にも有効であり、バンプ表面の平滑化と常温接合に寄与することが示された。これらの実験結果は、本研究で示した平滑

化手法が、さまざまな電子デバイスのパッケージングおよび接合において重要となるAuめっきの常温直接接合に適用可能であり、将来の電子デバイス実装プロセスへの寄与が期待される。

## 謝辞

本研究の実施に際し、共同研究者であるLe Hac Huong Thu氏(産業技術総合研究所)、松前貴司氏(産業技術総合研究所)、高木秀樹氏(産業技術総合研究所)、倉島優一氏(産業技術総合研究所)、津田貴大氏(関東化学株式会社)、清水寿和氏(関東化学株式会社)、徳久智明氏(関東化学株式会社)、小関奨吾氏(東北大学博士課程前期2年の課程)、後藤慎太郎氏(東北大学博士課程後期3年の課程)にご協力をいただきました。また、本研究の一部は、JST、ASTEP、JPMJTM20BNの支援およびJSPS科研費23H01460、23K26154の助成を受けて行われました。感謝申し上げます。

## 参考文献

1. V. Dragoi, G. Mittendorfer, J. Burggraf, and M. Wimplinger. Metal Thermocompression Wafer Bonding for 3D Integration and MEMS Applications. *ECS Transactions*. 2010, 33, 4, 27-35.
2. K. Tanida, M. Umamoto, T. Morifuji, R. Kajiwara, T. Ando, Y. Tomita, N. Tanaka, and K. Takahashi. Au bump interconnection in 20 $\mu$ m pitch on 3D chip stacking technology. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2003, 42, 10R, 6390-6395.
3. G.-S. Park, Y.-K. Kim, K.-K. Paek, J.-S. K., J.-H. Lee, and B.-K. Ju. Low-Temperature Silicon Wafer-Scale Thermocompression Bonding Using Electroplated Gold Layers in Hermetic Packaging. *Electrochemical and Solid-State Letters*. 2005, 8, 12, G330-G332.
4. Y. Kurashima, A. Maeda, J. Lu, L. Zhang, and H. Takagi. Room-temperature direct bonding of electroplated Au patterns flattened by a thermal imprint process. *Microelectronic Engineering*. 2014, 119, 48-52.
5. M. S. A. Farisi, H. Hirano, J. Frömel, and S. Tanaka. Wafer-level hermetic thermo-compression bonding using electroplated gold sealing frame planarized by fly-cutting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2016, 27, 1, 015029.
6. E. Higurashi, T. Imamura, T. Suga, and R. Sawada. Low-Temperature Bonding of Laser Diode Chips on Silicon Substrates Using Plasma Activation of Au Films. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2007, 19, 24, 1994-1996.
7. E. Higurashi, K. Okumura, Y. Kunimune, T. Suga, and K. Hagiwara. Room-Temperature Bonding of Wafers with Smooth Au Thin Films in Ambient Air Using a Surface-Activated Bonding Method. *IEICE Transactions on Electronics*. 2017, E100.C, 2, 156-160.
8. M. Yamamoto, T. Matsumae, Y. Kurashima, H. Takagi, T. Suga, T. Itoh, and E. Higurashi. Comparison of Argon and Oxygen Plasma Treatments for Ambient Room-Temperature Wafer-Scale Au-Au Bonding Using Ultrathin Au Films. *Micromachines*. 2019, 10, 2, 119.
9. K. Takeuchi, J. Wang, B. Kim, T. Suga, and E. Higurashi. Room temperature bonding of Au assisted by self-assembled monolayer. *Applied Physics Letters*. 2023, 122, 5, 051603.
10. K. Takeuchi and E. Higurashi. Wafer Bonding of GaAs and SiC via Thin Au Film at Room Temperature. *Micromachines*. 2025, 16, 4, 439.
11. H. Takagi, R. Maeda, T. R. Chung, N. Hosoda, and T. Suga. Effect of Surface Roughness on Room-Temperature Wafer Bonding by Ar Beam Surface Activation. *Japanese Journal of Applied Physics*. 1998, 37, 7A, 4197-4203.
12. M. Yamamoto, T. Matsumae, Y. Kurashima, H. Takagi, T. Miyake, T. Suga, T. Itoh, and E. Higurashi. Wafer-scale Au-Au surface activated bonding using atmospheric-pressure plasma. 2019 International Conference on Electronics Packaging (ICEP).

361-364.

13. M. Yamamoto, T. Matsumae, Y. Kurashima, H. Takagi, T. Suga, S. Takamatsu, T. Itoh, and E. Higurashi. Effect of Au Film Thickness and Surface Roughness on Room-Temperature Wafer Bonding and Wafer-Scale Vacuum Sealing by Au-Au Surface Activated Bonding. *Micromachines*. 2020, 11, 5, 454.
14. S. Lee, S.-S. Bae, G. Medeiros-Ribeiro, J. J. Blackstock, S. Kim, D. R. Stewart, and R. Ragan. Scanning Tunneling Microscopy of Template-Stripped Au Surfaces and Highly Ordered Self-Assembled Monolayers. *Langmuir*. 2008, 24, 12, 5984-5987.
15. N. Vogel, J. Zieleniecki, and I. Köper. As flat as it gets: ultrasmooth surfaces from template-stripping procedures. *Nanoscale*. 2012, 4, 3820-3832.
16. E. Higurashi, M. Yamamoto, R. Nishimura, T. Matsumae, Y. Kurashima, H. Takagi, T. Suga, and T. Itoh. Formation of smooth Au surfaces produced by multiple thin-film transfer process based on template stripping for low-temperature bonding. 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 223-228.
17. S. Koseki, M. Ogino, K. Takeuchi, L. H. H. Thu, T. Matsumae, H. Takagi, Y. K., T. Tsuda, T. Tokuhisa, T. Shimizu, and E. Higurashi. Template Stripping Process Combined With Polyimide and SiO<sub>2</sub>/Si Templates for Obtaining Smooth Au Surfaces. 2024 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), 129.
18. K. Takeuchi, S. Koseki, L. H. H. Thu, T. Matsumae, H. Takagi, Y. Kurashima, T. Tsuda, T. Tokuhisa, T. Shimizu, and E. Higurashi. Room temperature bonding of Au plating through surface smoothing using polyimide template stripping. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2025, 383, 116211.
19. S. Koseki, K. Takeuchi, L. H. H. Thu, T. Matsumae, H. Takagi, Y. Kurashima, T. Tsuda, T. Tokuhisa, T. Shimizu, and E. Higurashi. Smoothing of Plated Au Bumps Based on Template-Stripping for Low-Temperature Bonding. 2025 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC), 115-116.