特集

世界に視る溶接・接合科学技術のフロントライン

第II部 溶接・接合科学のフロントライン

マイクロ接合とナノ接合における最近の進歩*

Y. Zhou** and A. Hu**

Y. Zhou

A. Hu

Materials Design in Micro/Nano-Joining*

by Y. Zhou** and A. Hu**

キーワード マイクロ接合, ナノ接合, ナノアセンブリ

1. はじめに

マクロ、マイクロやナノといったサイズに関わらず、溶接、ろう付、はんだ付、接着などの接合技術は、機械化とそれによる集積化、電気的接続、光接続、環境保護など、様々な機能を提供し、製品の組み立てをはじめとする製造業における要素技術となっている。機械的結合を除く接合技術は、マクロ、マイクロおよびナノサイズで構造物として組み立てるために、接合面間で一次の（ときに二次の）化学的結合の形成を通じて、恒久的に一体化したものを生産することを目的としている。

益々厳しくなるコスト削減、性能や信頼性の向上などの要求に加えて、止まることのない部品やシステムの微細化が、既存の接合技術に対して新たな課題をもたらしている。例えば、マイクロスコピックあるいはナノスコピックなレベルの部品では、継手に対する健全性と信頼性を求めるうえに、限られたサイズの構成要素に対する過度のダメージを避けるために、エネルギー源にはさらなる高精度な制御が求められている^{1, 2)}。太陽電池や液晶ディスプレイ、フレキシブル・マイクロ電子部品のようなプラスチックや分子成分でできた新たな機器は、通常の接合法で一般に用いられるような高温にさらすことはできない。ある条件下では、低い加工温度で形成された電気相互接続が、自動車エンジンの作動温度に近い高温に耐えなければならない場合がある³⁾。さらに、構成要素が小さくなればなるほど（例えば、100 nm 未満のサイズにまでなると）、ときに表面張力が重力に比べて大きくなり、（例えば、工具から部品を放すことができなくなるなど）接合すること自体が困難となる⁴⁾。ほとんどのマイクロサイズの部品、とくにナノサイズのものに至って

は、既存のロボット技術や組み立てラインでの操作が難しく、少なくとも経済的ではないのが現状である^{5, 6)}。MEMS（マイクロ・エレクトロ・機械システム）や NEMS（ナノ・エレクトロ・機械システム）の商品化においては、適切な組み立て技術の確立が極めて重要である⁷⁻⁹⁾。

「マイクロ接合」という言葉は、すでに一般に普及した用語となっており、「ナノ接合」もそうなりつつあるとはいえ、それらは漠然とした定義となっており、それらの多くが、従来のマクロなサイズの溶接・接合技術と比較して、サイズが小さいという意味で使われている。「マイクロ接合」と「ナノ接合」の一般的な一つの定義は、被接合体（部品や構成要素）の大きさに基づくものである。例えば、箔の厚さやワイヤ径が数百ナノメートル以下である場合のように、特殊な大きさや形状の部品や構成要素の接合は、ナノ接合と呼ばれることになる。同様に、マイクロ接合も、数百ナノメートルよりも大きく、数百ミクロンより小さいものの接合を取り扱うものと定義されることになる^{1, 10)}。しかし、実際には、マイクロ接合やナノ接合の定義は、加工特性、（例えば、精密加工のような）装置特性、被接合材などの工業的あるいは応用する分野に基づくようなものの方が良いという考え方もある。例えば、通常のアーク溶接が数百アンペア以上で施工されるのに対して、アークマイクロ溶接は、溶接電流が0.5から50 Aの間で行われる。通常の抵抗溶接では、電極加圧力が数百 kg であるのに対して、抵抗マイクロ溶接は、電極加圧力が100 gから70 kgの間で実施されるものとして定義されている¹⁰⁾。通常、数百ミクロン以上の直径のワイヤや同厚さの箔を構造成材料として取り扱う超音波接合と比較して、マイクロ・エレクトロニクス・ワイヤボンディングは（ときとして数百ミクロン程度の場合もあるが）、通常は25ミクロン未満の直径のワイヤを用いる超音波マイクロ接合プロセスである¹¹⁾。

表1に例示するように、マイクロ接合を、固相接合、

*原稿受付 平成22年12月13日
** Centre for Advance Materials Joining, University of Waterloo 200
University Avenue West, Waterloo, Ontario, N2L 3G1 Canada

表1 マイクロ接合とナノ接合の代表例

	Microjoining [1]	Nanojoining
Solid-state bonding	Anodic/Wafer, Diffusion, Ultrasonic wire bonding; Cold, Explosive, Friction stir, Friction welding, etc.	Diffusion bonding [3,13], Ultrasonic welding [14,15], Cold welding [16, 17]
Soldering/Brazing	Diffusion, Furnace, Induction, Laser reflow, Resistance, Eutectic soldering/brazing; Dip, Wave, Vapour phase, Fluxless soldering; Active brazing; Flip chip bonding; etc.	Liquid-phase reflow soldering [18], Resistance soldering [19], Active brazing [20,21]
Fusion welding	Electron & Laser beam, Percussive, Plasma, Gas tungsten, Percussive, Resistance welding; Glass sealing; etc.	Laser beam [2, 22], Resistance welding [23]
Adhesive bonding	Adhesive die attachment, Adhesive flip chip bonding, Adhesive sealing, etc.	Nanofiller-enhanced adhesives bonding
New		Electron beam welding of CNT [11]

図1 単層カーボンナノチューブ間に形成された分子結合 ((a) ナノ溶接前, (b) X 結合および (c) Y 結合), 左欄に TEM により観察した組織を, 中央に模式図を, 右欄に計算用モデルをそれぞれ示す¹¹⁾。

溶融溶接, ろう付／はんだ付および接着など従来の方法で分類するのは, 比較的容易である¹⁾。しかし, この分類方法をナノ接合に適用し得るか否かについては, 未だに結論が出ていない。例えば, 図1に示すように, カーボンナノチューブ (CNTs) では, 透過型電子顕微鏡の中で, 様々な幾何学形状・配列の継手 (接点) が形成されている¹⁰⁾。このカーボンナノチューブ環は, (空孔と格子を作り出す) 高密度の電子ビームを用いて, 損傷したカーボン構造を復元することによって作られている。この現象が, 固相状態で結合されているのか?あるいは溶融溶接過程であるのか?については, 表1に示すように, 未だ議論の余地がある。このような現状ではあるが, ナノサイズの構造要素の接合に対する新たな要求は止まることを知らず, 継続して革新的なプロセスが発明されることが, 常に期待され続けている。多くの既存のマイクロ接合プロセスについても, ナノ接合に応用するために, さらなる開発や改良がなされるかもしれない。例えば, マクロサイズで利用するために確立された電子ビー

ム溶接技術については, 現在, マイクロレベルへの展開が図られており^{1, 12)}, さらにナノ接合への適用にまで発展することも期待される。他の有望な技術としては, イオンビーム・ナノ溶接に注目が集まっている¹⁾。

本稿では, 現在のマイクロ接合およびナノ接合に関する技術の進歩について総覧した結果を紹介する。プロセス特性や技術的難関 (課題) については, 例としていくつかの選択したプロセスについてのみ分析した結果を述べる。研究の応用事例と今後の展望についても論じる。

2. マイクロ接合の進歩と課題

マイクロ接合とその応用については, すでに成熟期に入っていると考えられているものの, 常に微細化が進捗し続けているために, 実際には難題に直面している。例えば, 電気的や機械的, 流体的および光学的な各種機能を持つ個々の部品が接続された後, 外部環境にさらされることになる MEMS 部品の実装と相互接続に対しては, 新たなマイクロ接合プロセスの確立が, 常に急務となっている²⁰⁾。後者は, センサー技術において, とくに問題となる。まずは, システムとして, 機械的なダメージ (損傷) や腐食から保護されていなければならない。その一方で, 物理的かつ化学的にひずみの無い本来の特性を発揮する環境を, より広げなければならない。このため, マイクロシステムにおける, いかなるさらなる生産の拡張においても, 実装と相互接続の技術が重要な役割を果たすものと理解されている²⁰⁾。したがって, 電子機器, 精密機器, 医療機器および各種システムの微細化において, マイクロ接合は, 引き続き決定的な役割を担うであろう。以下に, マイクロ電子機器の実装と医療における埋め込み機器の分野における技術的進歩と課題の例を紹介する。

2.1 マイクロ電子機器のワイヤボンディングにおける集積回路中でのセンシング

超音波ワイヤボンディングは, マイクロチップを製造する上で不可欠な手順となっており, 集積回路の金属パッド間のマイクロワイヤの接合にも用いられている¹⁾。銅のような硬いワイヤや不完全な接合条件による過度の応力は, ボンドパッドの剥がれや微小な割れおよびシリコ

図2 マイクロセンサーと統合されたテストパッド上のボールボンド部の SEM による微細組織の観察結果²⁵⁾

図3 異なるレーザー出力でレーザー加工（溶接）されたニチノールと受け入れ材の示差熱量測定（DSC）結果³²⁾

ン基板のへこみのようなチップの重大な損傷を引き起こしかねない²⁵⁾。このことから、圧電抵抗マイクロセンサーがボンディングパッドに近接し、統合されるなど、応力のオンライン・モニタリングは、過去10年間において、盛んに研究・開発されるトピックとなってきた（図2参照）。このようなひずみゲージは、接合時の付加応力や超音波の持続時間や振幅などのプロセスパラメータの変化による局所的な応力や温度変化を捉えることができる²⁶⁾。この技術を使って、銅ワイヤや絶縁された金ワイヤ（あるいは、X-wires, Microbonds®（カナダ））を用いた先進的なワイヤボンディングが開発されている²⁵⁻²⁷⁾。

2.2 レーザ溶接されたニチノール中の相変態

レーザーマイクロ溶接は、非接触での加工が可能であることと、潜在的にマイクロサイズの接合を実現し得る特性を有することから、微細な製品の溶接に対して、比較的容易に実施することができる。とくに、このプロセスでは、高密度のエネルギーを局所に投入することができることから、入熱を極小にし、その結果、熱影響部を極めて狭くすることができる。一方、ニチノールは、その形状記憶効果、擬弾性、および良好な強度と延性に基づく生体適合性といった特徴的な材料特性により、医療機器への応用に対して魅力的な可能性を有している。しかしながら、材料特性の変化は、ニチノールのレーザーマイ

図4 埋め込み型密封ケースのろう付部品³³⁾

クロ溶接において問題となっている²⁸⁻³¹⁾。例えば、レーザー加工は、ニチノールの相変態特性を変化させることが示されている（図3参照）。

図3に示すように、レーザー溶接後の試験片においては、溶接部に異なる相変態が生じていることを示す2対の相変態を表すピークが認められた³²⁾。微細組織観察による解析では熱影響部における結晶粒サイズの顕著な変化は見られなかったが、X線回折（XRD）による解析では、室温では、受け入れ材はオーステナイト単相となっているのに対して、溶接された試料ではマルテンサイトとオーステナイトが共存していることが証明されている。このニチノールにおける相変態特性の変化は、機器の設計と製造において考慮する必要がある³²⁾。

2.3 埋め込み型生体医療装置のためのセラミックスと金属のろう付

埋め込み型パルス発生器は、慢性的な痛みのシグナルを覆い隠すための電流パルスを得るのに利用し得る。しかし、そのような装置（例えば、the BION®マイクロ刺激装置）には、強さと密封性と生体適合性のあるセラミックスと金属のケースが必要となる³³⁾。そのようなセラミックスと金属のケースがいかにして組み立てられているかという一例を示す。図4に示すように、正確に生体適合性の良好な合金であるニチノールの組成となるように、チタンとニッケルの薄箔を1対1になるように重ねて、ろう付が行われている。セラミックスと金属の生体適合性については、埋め込み後の羊の細胞の顕微鏡写真による検査で実証されている。この接合部においては、試験管内培養による培養試験により、ニッケル含有量が50%以下のニッケル-チタン合金については、生体適合性が良好であることが示されている。なぜなら、それらの合金内にはフリーなニッケル元素が存在しないためである³⁴⁾。この例は、埋め込み型医療機器に求められる生体適合性に合致したろう付材料を慎重に選択することが重要であることを明示している。

3. ナノ接合の進歩と課題

ナノワイヤやナノチューブのようなナノスケールの構成要素の組み立て、それら同士から、ナノスケール部品

図5 銀ナノ粒子の SEM 画像 ((a) 室温, (b) 250°C で焼結されたもの. 100 nm のスケールに対応)³⁾

やシステム, それからその周辺機器, さらにはマイクロスケールにマクロスケールの装置やシステムに対してまで適用できるような, 新たな接合プロセスの開発が求められている. さもなければ, これらの部品やシステムの工業用規模の製品への展開は不可能である. 複雑なナノサイズの装置の構造における最近のナノテクノロジーの発展は, ナノエレクトロニクスや NEMS, ナノフォトニクス (光通信), プラズモニクスおよびナノ光学, ナノ・バイオテクノロジー, やナノ医薬など, 多くの革新的な分野を生み出している. このような新興技術は, マイクロエレクトロニクスや MEMS センサー, マイクロ流体工学, 光 (太陽) 電池や薄膜技術などが, ナノレベルでの基礎的かつ機能的な装置を組み立てるため, ナノ接合のための技術へと次々に展開された結果によるものである. 本章では, ナノレベルでの結合が, 金属結合なのか, イオン結合なのか, あるいは共有結合によるものなのか, といった基礎的な化学結合の議論に基づくナノ接合における最先端技術の進歩について総覧した結果を紹介する. なお, 機械的な接合や接着によるナノ接合は, 本稿では対象としていない. ナノ接合の一つである, 個々のカーボンナノチューブの結合においては, ファンデルワールス力が, その基礎となっている^{35, 36)}. しかし, この結合では, ナノベアリング (軸受) への適用に対して提案し得るほどの強さは無い³⁷⁾.

3.1 固相ナノ接合

金属ナノ粒子の接合に用いられている拡散ナノ接合は, 最近の研究においても頻繁に用いられているナノ接合プロセスの一つである. この固相状態でのナノ接合プロセスでは, 拡散を通じてナノ粒子は焼結されてネットワークを形成し, それと同時に基材とも接合される. ナノ粒子のサイズが小さくなるにつれて, 表面拡散の影響が大きくなり^{38, 39)}, バルク体よりもはるかに高い特有の表面エネルギーが現れる⁴⁰⁾. 原則として, 2つのナノ粒子間での固相拡散の駆動力 σ は, 次式 $\sigma \approx \gamma \kappa$ で表される. ここで, γ は固有の表面エネルギー, κ は表面の曲率である. 拡散の駆動力は, 明らかに粒子サイズに対して逆比例となっている. 高い拡散の駆動力は, 焼結温度の減少によりもたらされる. 一方, 粒子サイズを小さくするこ

とによって, ナノ粒子の融点も明らかに減少する^{39, 41)}. ナノ粒子は, 金属結合あるいは共有結合の形成を通じて金属やセラミックスの基盤と結合されると同時にネットワークと焼結される^{3, 13)}.

有機マイクロエレクトロニクスへの適用を目的として, 低温でのナノサイズの拡散接合に注目が集まっている^{3, 42)}. 表面がコーティングされていない銀ナノ粒子が, 室温で良好に焼結されたことから⁴³⁾, 接合温度を室温にまで下げることができることが判明したといえども, 拡散接合までの間, ナノ粒子を室温で長期間保存する必要があることから, やはり表面コーティングは必要である. もう一つの方法として, 銀ナノ粒子は, 焼結前に金属-有機化合物 (Ag_2O ⁴⁴⁾や Ag_2CO_3 ⁴⁵⁾ など) を 200°C から 250°C の温度で分離することにより^{13, 42)}, 直接合成することができる^{13, 42-45)}. 最近の研究では, ある種の革新的な有機殻は, クエン酸塩と Ag_2CO_3 を混合させて厚さ 1~3 nm の状態で保持することにより, 銀ナノ粒子に直接コーティングされ, そしてそれは, 非常に低温で分解できることがわかっている^{3, 46)}.

図5に示す SEM 画像のように, 室温では凝集している状態の銀ナノ粒子が, 160°C で10分間保持されることにより焼結されていることがわかる. これは, 室温では分離していたこれらのナノ粒子が, 160°C では隣接する粒子との間でネックを形成し始めていることを示している. 最も低い焼結温度は, プラスチック基板上へのフレキシブルなエレクトロニクス実装が期待できる銅ワイヤと銅箔の接合における約100°Cであると考えられている^{3, 46)}. 一方, 金属ナノ粒子を用いた拡散接合継手では, 焼結により形成された継手部が, 接合温度よりも高融点となることから, 同温度よりも高温での使用も可能となる^{3, 46)}.

拡散ナノ接合も, 蒸着あるいはその他の手法により, 基盤に薄膜として付着された形のチタン/金ナノフィルムを使って実施されている^{47, 48)}. 時効処理後, 金の薄膜間における接触抵抗は, MΩレベルから kΩレベルにまで減少する.

他の固相接合プロセスも試みられている. 例えば, 一般に, 通常サイズの接合やマイクロ接合に利用される超音波接合では, 高いエネルギー変換効率を有するカーボ

ンナノチューブを基盤とした太陽電池に応用するために¹⁵⁾、カーボンナノチューブとチタン電極の接合¹⁶⁾に用いられている。炭素-チタン結合の形成により、ナノチューブと電極間では低い抵抗接点を得られている¹⁴⁾。STM（走査型トンネル顕微鏡）付きのTEM（透過型電子顕微鏡）を使って、Luら¹⁶⁾は、単なる機械的接触あるいは比較的弱い圧力のみで、極小径の金ナノワイヤの低温溶接を実現したことを示しており、またその溶接部の強さは、元のナノワイヤの強度と比べて高く、600MPa程度にまで達したとしている。

3.2 ナノソルダーリング（ナノはんだ付）およびナノブレイジング（ナノろう付）

鉛フリーの低融点ははんだとはんだ付技術は、エレクトロニクス分野の組立と実装において広く用いられている。最近では、マイクロおよびナノ電子機器の集積と組立において、ナノはんだ付に大きな関心が寄せられている^{49), 50)}。良好なナノはんだ付を実現するには、極少量のはんだが、極めて狭い接合領域に正確に送給されなければならない。したがって、プロセスと操作における様々な方策を新たに開発する必要がある。

GiritとZettelは⁵¹⁾、炭素の単原子層（要素）上に抵抗接点を作るために、インジウムとスズ合金のはんだ付に対して、タンゲステンチップとともにマイクロマニピュレーターを用いた。Guらは、ナノ多孔質 Casting 中の電子蒸着法を用いて、多岐にわたる金属ナノワイヤを製造した^{9, 18, 49)}。スズは、ニッケル/金を下地とした金ナノワイヤの端部で成長し（ニッケルは拡散障壁として、金は湿潤層として機能）、その後、スズ/金/ニッケルで被覆された金ナノワイヤが、溶融媒体の中で、同時にリフローはんだ付される¹⁸⁾。三次元ナノワイヤネットワークを形成するため、ナノワイヤの整列には磁場も用いられる⁹⁾。Pengらは、ジュール加熱で溶融させたスズ-金ナノワイヤをはんだとして、SEMの中のナノマニピュレータを使って、金ナノワイヤを白金-コバルトナノワイヤに接合した¹⁹⁾。

Mafuneらは、三次元ネットワークを形成することを目的として、金ナノ粒子を溶かし、白金ナノ粒子とろう付するために、ナノ秒パルスレーザを用いた⁵²⁾。Wuらは、銀-銅-チタン合金を用いた 10^{-6} Torr 真空下での真空ろう付により、カーボンナノチューブ（CNT）をニッケル電極に接合した²⁰⁾。図6に、ろう付されたカーボンナノチューブとニッケル電極との接合部付近の断面のSEM画像を示す。この図より、カーボンナノチューブ近傍にはチタンの存在が認められる。チタンと炭素の共有結合が形成されることによって、ろう付が達成されていることが、実験結果より明らかとなっている。接合強度は、接合温度が900℃から950℃付近で最高値を示す。なぜなら、それ以上に高温になると、ろう材と触媒化合物の反応により、カーボンナノチューブが劣化し始めるためである。このカーボンナノチューブのろう付により、高い発光効果を持つ白熱灯フィラメントが作り出された²¹⁾。

ナノろう付のために、ナノ・テルミットが最近開発されている^{53, 54)}。Wangらは、コーティングされたアルミ・ナノ粒子と酸化銅粉末との反応から生じた熱が、還元した銅ナノ粒子の溶融に使えること⁵⁵⁾、また、その溶融した

図6 ろう付部付近のカーボンナノチューブ束の断面組織（A：銅，B：銀，C：カーボンナノチューブ）

図7 白金ワイヤ溶接部の SEM 画像：(a) 電流印加前、(b-d) それぞれ電流印加後、1.6 および21秒後のスナップショット²³⁾。

銅がIC実装のろう付工程に利用できることを発見した。

3.3 溶融ナノ溶接

溶融ナノ溶接プロセスは、レーザビーム^{2, 22)}や抵抗スポット溶接におけるジュール発熱²³⁾、あるいは抵抗加熱によるホットステージ⁵⁶⁾など、様々な異なる熱源を用いて試みられている^{2, 22)}。前述のように、集束電子ビーム（FEB）と集束イオンビーム（FIB）は、溶融ナノ溶接への応用が期待されている^{1, 12)}。図7に、2本の白金ナノワイヤのジュール加熱による溶接プロセスを示す²³⁾。SEMの鏡筒内で、圧電操作によって、2本の白金ナノワイヤの端部同士が接触し、フィードスルーを通じて流れる2.2mAの溶接電流で溶接されていることがわかる。ワイヤ間の電圧は、溶接部が形成された時点で一時若干の低下が生じるものの、接合表面でそれらが結合していく間は変化しない。

SEM内に設置されたホットステージが、カーボンシースの薄層でコーティングされた2本のゲルマニウム・ナノワイヤの溶接に利用されたことが報告されている⁵⁶⁾。この局所的な溶接は、それらのゲルマニウム・ナノワイヤを、接触位置で同時に溶融させた後、凝固させる、カーボンシースの多孔質という特性により実現可能となっている。

溶融ナノ溶接法は、SEM、AFM（原子間力顕微鏡）、STMやTEMのディスプレイを見ながら操作できることから、ナノ構造体の接合において、目覚ましい成功をお

図8 フェムト秒レーザーナノ溶接前後の金ナノ粒子の TEM 画像²⁾

さめている。しかし、このような方法といえども、技術的には様々な問題をかかえており、その中には、接合時間の長さとして起因した高コストのように、実験室での研究レベルでは良いものの、大量生産に対して実用的で無いといったことも含まれている。

3.4 超高速レーザーナノ溶接

ピコ秒あるいはフェムト秒といったレベルの時間幅の超高速レーザーパルスと材料との反応は、非熱過程として知られているため⁵⁷⁾、本稿では、同レベルのパルス幅のレーザーによる超高速ナノ溶接は、他の熔融溶接プロセスとは分けて総覧した。電子-格子間での熱的な結合に要する時間（標準的には約1ピコ秒）は、レーザーパルス幅に比べて十分に長いため、電子には格子にエネルギーを伝達するだけの十分な時間が無い。電子は、励起され、放出されることから、格子原子間の化学結合が弱くなることになる。その結果、表面の原子において溶融が生じ、これが超高速非熱溶融となる⁵⁸⁻⁶⁰⁾。この溶融は、バルクにダメージ（損傷）を与えることなく、ナノスケールの深さまでのごく表層においても生じる。したがって、ナノ粒子の溶接には有効であると考えられる^{57, 61)}。図8に、100フェムト秒のパルス幅のレーザーで溶接された金ナノ粒子のTEMによる組織観察の結果を示す。

4. ナノアセンブリ（組み立て）

ナノサイズの構造要素の操作と位置決めは、いかなる良好なナノ接合においても、その第一段階であるといえる。また、SEM, AFM, STM および TEM 内での操作により、従来の操作や位置決め方法に加えて、自己組織化、ナノインク・インプリンティング（刷り込み）、近視野光学顕微鏡法および光ピンセットなど、新たな技術が生み出されている。このようなナノスコピックな（つまり、ナノレベルの視野における）マニピュレーションにおける今後の戦略としては、異なるナノ接合プロセスと組み合わせることによって、ナノサイズ機器の製造における大量生産を実現することとなる。

規則正しい一次元、二次元および三次元の構造体を形成するために、数百、数千といった構成要素を思いのままの方向に位置合わせすることを可能とする自己組織化

図9 磁気自己組織化されたスズ-金-ニッケル-金-スズ多接点ナノワイヤ ((a) 液中での磁気組織化, (b) 位置合わせされたナノワイヤ, (c) リフローはんだ付されたナノワイヤ。はんだ付部が2本のナノワイヤ間に差し込まれている。)⁶⁶⁾

は、ナノからマイクロ、ミリメートルサイズから一般的なサイズのシステムにまで、あらゆるスケールを通じて認められている。それゆえ、このような組立工程は、単純かつ短時間であり、バッチ処理への拡張性とコスト削減効果を有する。自己組織化における最近の進歩としては、形状認識^{4, 6)}、重力⁶³⁾、毛細管力⁶⁴⁾、液体はんだ⁶⁵⁾、および磁界^{18, 66-68)}あるいはその型⁶⁹⁾といった領域にまで展開されていることである。図9に、液状媒体中での磁気自己組織化による、スズ-金-ニッケル-金-スズ多接点ナノワイヤのリフローはんだ付の様子を示す⁶⁶⁾。

ナノインク・インプリンティング（刷り込み）は、マイクロ電子機器における金属ナノ粒子配線のマイクロスケールでのパターンニングに対して、経済的かつ汎用性の高い技術であることから、ナノアセンブリにおけるもう一つの興味深い進歩であるといえる⁷⁰⁾。キャリア溶液中で分散するナノ粒子インクをプリンティングすることにより、配線を電子基盤上に直接書き込むために、プログラミング制御と同時に圧電駆動のマイクロノズルが採用されている。この技術では、大量生産するために要する時

図10 高分子基盤上への導体パターン形成を目的とした、インクジェット印刷された金属ナノ粒子のレーザー焼結。焼結されていないナノ粒子は、容易に有機溶媒中に洗い流される⁷⁰⁾。

間、コストおよび空間が削減できるとともに、現在のマイクロエレクトロニクス生産技術と融合させることも十分可能である。さらに、ナノスケピックな拡散接合、はんだ付/ろう付あるいは溶融溶接との組み合わせにより、同技術をナノ接合プロセスに組み込むことが可能であることは、論を俟たない。銅と銀は、マイクロエレクトロニクスへの応用に対して、高い潜在能力を持つナノ粒子の典型例であるといえる^{70, 71)}。そして、それらの粒子は、レーザー⁷¹⁾および電流⁷²⁾か、またはマイクロ波⁷³⁾で焼結することが可能である。図10に示すように、高分子基盤上にインクジェット印刷された金属ナノ粒子をレーザー焼結することによって導体部が形成され、焼結されていないナノ粒子が有機溶媒中に洗い流されることにより、導体パターンが形成される⁷⁰⁾。

走査型近接場光学顕微鏡法 (SNOM) では、試料表面近くを走査するナノサイズのアパーチャー (開口部) を用いることによって、100 nm 未満の分解能が達成されている。この手法を用いることにより、ナノサイズの対象物に対しても、直接レーザーを照射して接合することが可能となる。光ピンセットでは、ナノ粒子を捕捉するのに傾斜した光場を利用する⁷⁵⁾。この手法は、非接触での (ナノ粒子の) 操作が実現できることが特徴である。これら二つの手法は、レーザーとの組み合わせにより、その場での (ナノ粒子の) 操作と溶接の実現が期待できる。

5. まとめと展望

マイクロ接合は、止まることを知らない電子機器、精密機器および医療機器や各種システムの微細化への要求に対し、今後も重要な役割を担い続けるであろう。またそれと同時に、最先端の材料接合技術といえるナノ接合が、ごく最近新たに開発されたところではあるものの、急速に研究・開発が進んでいることから、やがてはナノレベルの機器やシステムが産業として成功するためのキーテクノロジーとなるであろう。マイクロ接合・ナノ接合とも、革新的な既存プロセスの改良と新たなプロセスの開発が必要である。微細化の結果、マイクロ接合、とくにナノ接合において、例えば、(1) より高い分解能と精度を持つ熱源およびエネルギー源、(2) 高精度の精密機器と位置決め技術、(3) 統合的なセンシングとモニタリングの技術、などが必要となるなど、多くの課題に直面している。その他の基礎的および技術的な問題として、とくに注意が必要とされるものとしては、接合機構や生体適

合性、異材との組み合わせや (主にナノ接合に対しては) 産業応用、などが挙げられる。

(訳 大阪大学 森裕章)

参考文献

- 1) Y. Zhou, "Microjoining and Nanojoining". Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, England, CRC Press, 2008.
- 2) A. Hu, S. K. Panda, M.I. Khan, Y. Zhou, (2009) "Laser Welding, Microwelding, Nanowelding and Nanoprocessing", Chin. J. Lasers Vol.36, no.12, 3149.
- 3) A. Hu, J. Y. Guo, H. Alarifi, G. Patane, Y. Norman Zhou, G. Compagnini, C. X. Xu, Appl. Phys. Lett. 97 (2010) 153117.
- 4) W. Zheng and H. O. Jacobs, Adv. Mater. 18 (2006) 1387.
- 5) M. Waltz, Circuits Assembly 1 (2003) 32.
- 6) W. Zheng, P. Buhlmann, and H. O. Jacobs, PNAS 10 (2004) 12814.
- 7) Y. Zhou and M. Mayer, A keynote presentation in the Proceedings of the eleven CWS (Chinese Welding Society) Convention, Shanghai, May 26-28 (2005) D-46 to D-53.
- 8) K. W. Guo, Recent Patents on nanotechnology 3 (2009) 53.
- 9) G. Cui, F. Gao, S. Mukherjee, and Z. Gu, Small 5 (2009) 1246.
- 10) A. Cullison, Welding J. May 1996, 29.
- 11) Y. Zhou, www.Azonano.com
- 12) U. Diltthey and T. Dorfmueller, Microsys. Technol. 12 (2006) 626.
- 13) E. Ide, S. Angata, A. Hirose, K. F. Kobayashi, Acta Mater. 53 (2005) 2383.
- 14) C. Chen, L. Yan, E. Kong and Y. Zhang, Nanotechnology 17 (2006) 2192.
- 15) C. Chen, Y. Lu, E. S. Kong, Y. Zhang, and S. T. Lee, Small 4 (2008) 1313.
- 16) Y. Lu, J. Y. Huang, C. Wang, S. Sun, and J. Lou, Nat. Nanotech. 5 (2010) 218.
- 17) W. O. Akande, Y. Cao, N. Yao, and W. Soboyejo, J. Appl. Phys. 107 (2010) 043519.
- 18) F. Gao, S. Mukherjee, Q. Cui and Z. Gu, J. Phys. Chem. C 113 (2009) 9546.
- 19) Y. Peng, T. Cullis and B. Inkson, NanoLett. 9 (2009) 91.
- 20) W. Wu, A. Hu, X. Li, J. Wei, Q. Shu, K. Wang, M. Yavuz, and Y. Zhou, Mater. Lett. 62 (2008) 4486.
- 21) Y. Zhou, A. Hu, M. I. Khan, W. Wu, B. Tam, M. Yavuz, J. Phys. Conf. Ser. 165 (2009) 012012.
- 22) S. Kim and D. Jang, Appl. Phys. Lett. 86 (2005) 033112.
- 23) H. Tohmyoh and S. Fukui, Phys. Rev. B 80 (2009) 155403.
- 24) W. Menz, J. Mohr, O. Paul, "Microsystem Technology", Wiley-VCH, Weinheim, 2001.
- 25) Y. Huang, A. Shah, M. Mayer, N. Zhou and J. Persic, IEEE Trans. Ultrasonics, Ferr. And Freq. 57 (2010) 241.
- 26) A. Shah, M. Mayer, Y. Zhou, S. J. Hong, J. T. Moon, Microelec. Engr. 85 (2008) 1857.
- 27) A. Shah, M. Mayer, Y. Zhou, S. J. Hong, J. T. Moon, IEEE Trans. Elec. Pack. Manu. 32 (2009) 176.
- 28) M. I. Khan, S. K. Panda, and Y. Zhou, Mater. Trans. 49 (2008) 2702.
- 29) A. Falvo, F. M. Furguele, C. Maletta, Mater. Sci. Eng. A 412 (2005) 235.
- 30) A. Tissi, S. Besseghini, T. Ranucci, F. Sqatrito, M. Pozzi, Mater. Sci. Eng. A 273-275 (1999) 813.
- 31) Y. T. Hsu, Y. R. Wang, S. K. Wu, C. Chen, Metall.

- Mater. Trans. A 32 (2001) 569.
- 32) M. I. Khan and Y. Zhou, Mater. Sci. and Engr. A527 (2010), 6235-38.
 - 33) G. Jiang, D. Mishler, R. Davis, J. P. Mobley, J. H. Schulman, J. Biomed. Mater. Res. B 72 (2005) 316.
 - 34) D. Bogdanski, Biomaterials 23 (2002) 4549.
 - 35) T. Gong, Y. Zhang, W. Liu, J. Wei, C. Li, K. Wang, D. Wu, M. Zhong, Carbon 45 (2007) 2235.
 - 36) K. P. Yung, J. Wei, and B. K. Tay, Diamond Rel. Mater. 18 (2009) 1109.
 - 37) L. Dong, F. Arai, T. Fukuda, IEEE Trans. Mechatronics 9 (2004) 350.
 - 38) Q. Jiang, S. H. Zhang, J. C. Li, Solid State Comm. 130 (2004) 581.
 - 39) K. Dick, T. Dhanasekaren, Z. zhang, and D. Meisel, JACS 124 (2002) 2312.
 - 40) K. K. Nanda, A. Maisels, F. E. Kruis, H. Fissan, and S. Stappert, Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 106102.
 - 41) O. A. Yeshchenko, I. M. Dmitruk, A. A. Alexeenko, A. D. Dmytruk, Phys. Rev. B 75 (2007) 085434.
 - 42) C. Lu, P. Lin, H. Lin and S. Wang, Jpn. J. Appl. Phys. 45 (2006) 6987.
 - 43) D. Wakuda, M. Hatamura, K. Suganuma, Chem. Phys. Lett. 441 (2007) 305.
 - 44) T. Morita, Y. Yasuda, E. Ide, Y. Akada, and A. Hirose, Mater. Trans. 49 (2008) 2875.
 - 45) H. Tatsumi, Y. Akada, T. Yamaguchi, and A. Hirose, Adv. Mater. Res. 26-28 (2007) 499.
 - 46) H. Ararifi, A. Hu, M. Yavuz, and Y. Zhou, J. Elec. Mater. In press.
 - 47) Z. Yao, C. L. Kane, C. Dekker, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 2941.
 - 48) J. Chung, K. Lee, J. Lee, proceedings of 3rd IEEE conference on nanotechnology, vol. 1-2 (2003) 331.
 - 49) Q. Cui, F. Gao, S. Mukherjee, and Z. Gu, Small 5 (2009) 1246.
 - 50) W. Zheng and H. O. Jacobs, Adv. Mater. 18 (2006) 1387.
 - 51) C. Girit and A. Zettl, Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 193512.
 - 52) F. Mafune, J. Kohno, Y. Takeda, and T. Kondow, JACS 125 (2003) 1686.
 - 53) C. Rossi, K. Zhang, D. Esteve, P. Alphonse, P. Tailhades, and C. Vahlas, J. Microelectromech. Sys. 16 (2007) 919.
 - 54) R. Shende, S. Subramanian, S. Hasan, S. Apperson, R. Thiruvengadathan, K. Gangopadhyay, S. Gangopadhyay, Prop. Expl. Pyro. 33 (2006) 122.
 - 55) J. Wang, A. Hu, J. Persic, J. Wen, Y. Zhou, submitted to Phys. Chem. Mater.
 - 56) Y. Wu and P. Yang, Adv. Mater. 13 (2001) 520.
 - 57) A. Hu, M. Rybachuk, Q.-B. Lu and W. W. Duley. Appl. Phys. Lett. 2007, 91, 1319061.
 - 58) S. Nolte, C. Momma, H. Jacobsm, A. Tuynnermann, B. N. Chikov, B. Wellegehausen, and H. Welling, J. Opt. Soc. Am. B. 1997, 14, 2716.
 - 59) B. N. Chikov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, A. Tunnermann, Appl. Phys. A 63 (1990) 109.
 - 60) P. Stampfli, K. H. Bennemann. Phys. Rev. B. 1992. 46, 10686.
 - 62) P. V. Kamat, M. Flumiani, G. V. Hartland. J. Phys. Chem. B 1998, 102, 3123-3128.
 - 63) A. R. Tao, D. P. Ceperley, P. Sinsermsuksakul, A. R. Neureuther and P. Yang, NanoLett. 8 (2008) 4033.
 - 64) U. Srinivasan, M. A. Helmbrecht, C. Rembe, R. Muller, R.T. Howe, IEEE Select. Top. Quantum Electr. 8 (2002) 4.
 - 65) D. H. Gracias, J. Tien, T. L. Breen, C. Hsu, G. M. Whitesides, Science 18 (2000) 1170.
 - 66) F. Gao and Z. Gu, Nanotechnology 21 (2010) 115604.
 - 67) J. Ge, Y. Hu, and Y. Jin, Angew. Chem. Int. Ed. 46 (2007) 7428.
 - 68) T. Ding, K. Song, K. Clays, and C. Tung, Adv. Mater. 21 (2009) 1936.
 - 69) S. Camelio, D. Babonneau, D. Lantiat, and L. Simonot, Euro. Phys. Lett. 79 (2007) 47002.
 - 70) Y. Lee, J. Choi, K. J. Lee, N. E. Stott and D. Kim, Nanotechnology 19 (2008) 415604.
 - 71) S. H. Ko, H. Pan, C. P. Grigoropoulos, C. K. Luscombe, J. M. J. Frechet, and D. Poulikakos, Nanotechnology 18 (2007) 345202.
 - 72) M. L. Allen, M. Aronniemi, T. Mattila, A. Alastalo, K. Ojanpera, M. Suhonen and H. Seppa, Nanotechnology 19 (2008) 175201.
 - 73) J. Perelaer, B. de Gans, and U. S. Schubert, Adv. Mater. 18 (2006) 2101.
 - 74) R. Pomraenke, C. Ropers, J. Renard, C. Lienau, L. Luer, D. Polli, and G. Cerullo, NanoLett. 7 (2007) 998.
 - 75) R. Agarwal, K. Ladavac, Y. Roichman, G. Yu, C. M. Lieber and D. G. Grier, Opt. Expr. 13 (2005) 8906.