

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「微細バンプ形成用ナノパーティクルデポジション装置及び
微細バンプ接続応用技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成26年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 公益財団法人長野県テクノ財団

目 次

	頁
第 1 章 研究開発の概要	
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	5
1-3 成果概要	8
1-4 当該研究開発の連絡窓口	10
第 2 章 本論	
2-1 試作用 NpD 装置標準機の開発	11
2-2 微細バンプ形成プロセス及びバンプ接続プロセスの開発	15
2-3 量産用 NpD 装置の開発	20
第 3 章 全体総括	22

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

電子部品・デバイスの実装に係る技術において達成すべき高度化目標については、以下のよう
に高度化指針で提示されている。

(三) 電子部品・デバイスの実装に係る技術に関する事項

1. 電子部品・デバイスの実装に係る技術において達成すべき高度化目標

(1) 情報通信機器に関する事項

1) 高度化指針で定める情報通信機器に関する川下製造業者の抱える課題及びニーズ

情報通信機器は、小型化、高機能化、多機能化を図ることによって、その付加価値を
高めている。機器の小型化要求と高機能・多機能要求は、一般に相反する関係にあ
るが、情報通信機器に求められるニーズに対応していくためには、半導体の高機能化
に加え、筐体の中いかに電子部品を多く集積させていくかが求められている。この
ニーズに対応するため、電子部品とプリント配線板、半導体デバイス等を高密度に整
合させるインターポーザを組み合わせる等の電子実装技術が使われている。これらに
係る電子実装技術に関し、以下の課題が具体化してきている。

ア. 小型・高密度集積化

イ. 多機能化・高機能・大容量高速情報処理化

2) 高度化指針で定める情報通信機器に関する高度化目標

情報家電の多機能化・高機能化、小型化及び高速・大容量化へ対応した電子実装技
術の高度化目標は、以下のとおりである。

ア. 複数LSIチップのワンパッケージ化に伴う半導体パッケージ基板の高機能化
(3次元実装技術、エンベディド実装技術(部品内蔵基板技術))の開発

3) 電子実装技術における高度化目標の達成に資する特定研究開発等の実施方法

(2) 3次元実装によるSiP技術に対応した研究開発の方向性

① 3次元スタック構造の開発に資する電子実装技術の研究開発

ア. 貫通孔形成・めっき充填等の貫通電極形成技術、ウエハ薄板化研磨技術、精密
接続バンプ加工、ベアチップ検査技術、高精度ダイシング・積層技術、狭ピッ
チ・低ループワイヤ接続技術、低応力モールドリング技術、

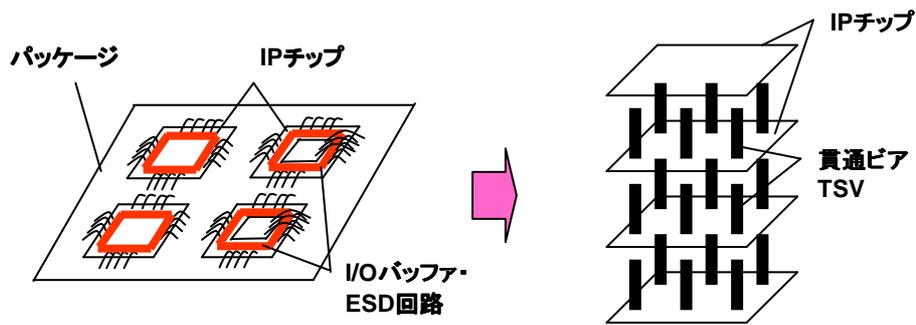
POP (Package On Package) 技術及びそれらの治具・金型・装置の研究開発

研究開発の背景

3次元LSI積層デバイス技術は、シリコンLSIデバイスの微細化技術限界を超えて集積度
を向上させるための新しい技術として近年着目されている。これは、LSIデバイスのシリ
コン基板内に表面から裏面に貫通する電極(シリコン貫通電極:TSV)を形成したものを複数
用意して、それらを微細金属バンプ接続により縦方向に積層して高度な電子システムを実現
する技術である。このような縦方向の配線が可能となるため、従来の2次元集積技術に比べ
て配線の自由度が増し、システム全体の配線長を大幅に短くすることが出来る。よって、以
下のようなメリットが期待されている。

①従来のLSIデバイスで長い距離の信号伝送に要していた増幅回路の削減とともに電力消
費量を大幅に低減させることができる。

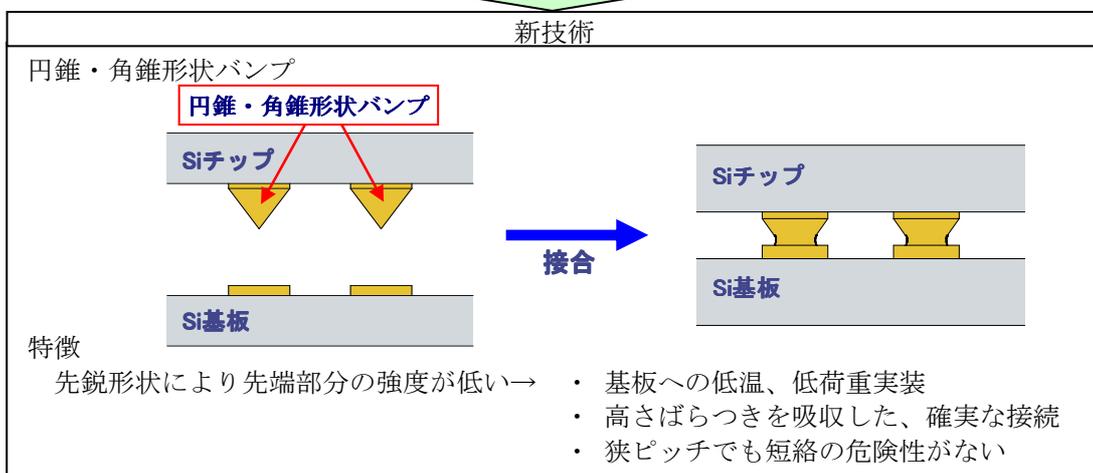
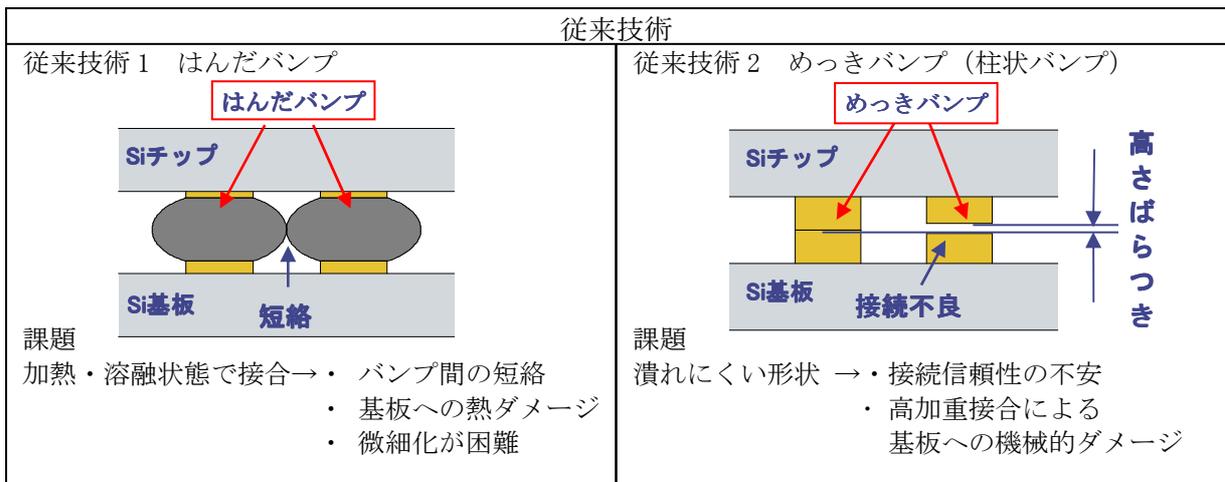
②従来のシステムオンチップ(SOC)技術で利用できるオンチップバス配線のビット幅に
比べて非常に大きなバス幅を利用できるため、並列処理アーキテクチャーの採用により、
システムクロック周波数を上昇させることなくトータルの信号処理能力を向上させるこ
とが可能となる。



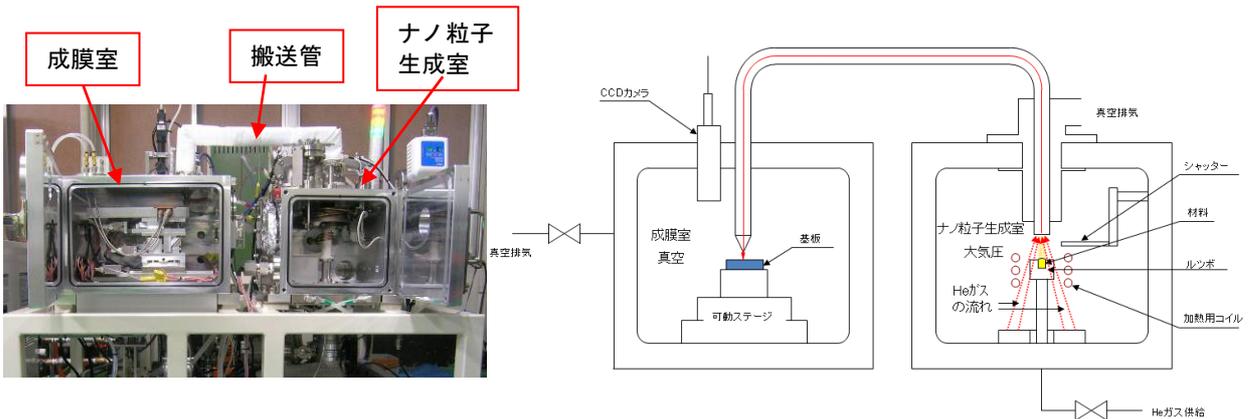
3次元LSI積層デバイス製造プロセス技術は、LSIデバイスの製造工程（いわゆる前工程）とLSIデバイスの実装工程（いわゆる後工程）の中間的な位置付けになるため、前工程側に取り込むのか、後工程側に取り込むのかで技術開発の方向性（量産規模（サイズ）、生産コストなど）が異なる。

前者の動きとしては、IMEC, SEMATEC, TSMC, ELPIDA, SAMSUNG など最先端LSIデバイス前工程に統合する形で300mmをベースとして、ウエハレベルの3次元LSIデバイス積層プロセスの開発が行われている。この方法は、300mm対応の大規模プロセス装置を準備する必要があり、研究開発のコストが膨大なものとなっており、過大な投資資金の確保が大きな課題である。

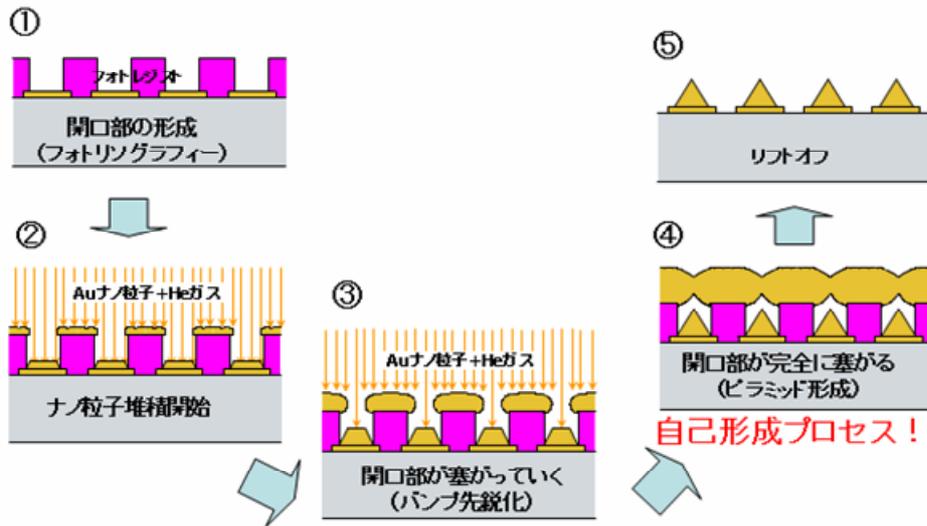
後者の動きとしては、LSIデバイスが形成されたウエハをチップに切り出したものをベースとして、低コストの後工程技術を発展させたチップレベルでの3次元LSIデバイス積層プロセスの研究開発がASET、産総研などで試作用途として行なわれている。



3次元実装においては、TSV形成プロセスにおけるアスペクト比の制約のため、基板の薄型化が進んでおり、接合時の加熱、加圧によるデバイスへのダメージが深刻な問題となっている。これを解決するため、先鋭化させた円錐・角錐形状の微細バンプを用いたフリップチップ接続技術が検討されている。円錐・角錐形状のバンプは、先端の機械的強度が低いため、小さな荷重で容易に変形させることが出来る特長を持つ。また、バンプ接続プロセスの低温化・低加圧化も期待できる。さらに、接続時の横方向への広がりも抑えられることから、高密度バンプ接続に最適である。この円錐・角錐形状の微細バンプは、金属ナノ粒子を生成し、不活性ガス流とともに吹き付けることで金属ナノ粒子膜の堆積が可能で、ナノパーティクルデポジション装置（NpD装置）を用いて形成できる。



(株)みくに工業で開発した NpD 装置（研究開発用のコンセプトプロトタイプ機）とその構成図



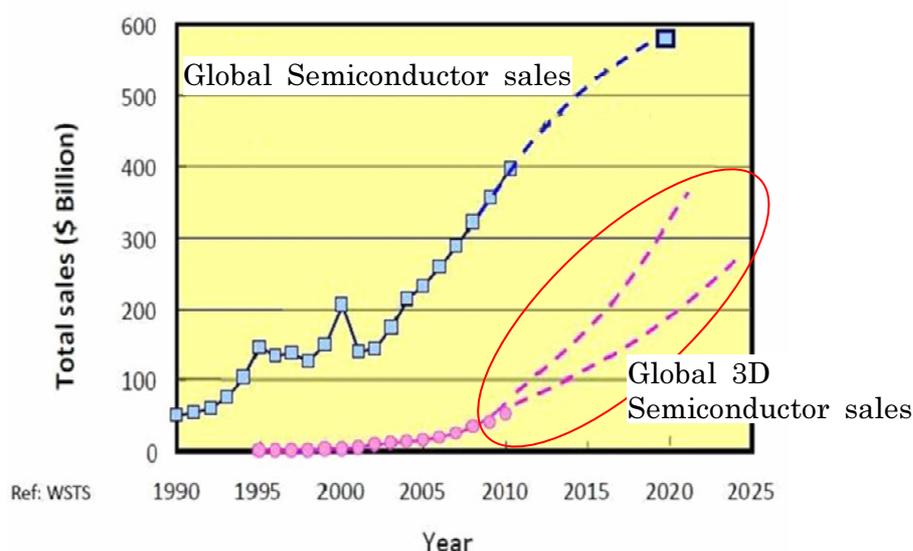
NpD 法による円錐・角錐形状バンプ形成プロセス

上に NpD 装置コンセプトプロトタイプ機の外観と構成図、及び NpD 法による円錐・角錐形状バンプ形成プロセスを示す。バンプを形成する基板の上に、フォトリソグラフィ技術によってマスクを形成する (①)。基板を NpD 装置へセットしてナノ粒子膜の堆積を開始 (②) すると、マスク上に堆積した金属が開口部を塞ぐ方向に成長 (ひさし構造と呼ぶ) するため、開口部内に形成されるバンプは次第に先細り状になっていく (③)。開口部が完全に閉塞すると、開口部内には先端の尖った円錐・角錐形状のバンプが形成されており (④)、マスクをリフトオフすることで、円錐・角錐形状の金属バンプが得られる (⑤)。このバンプを半導体デバイスと半導体パッケージの電極間接続に用いると、半導体デバイスと半導体パッケージのフリップチップ接続プロセスについて、低温、低加重化が期待できる。しかし、NpD 装置コンセプトプロトタイプ機では成膜速度の向上や再現性向上等の課題があり、製造ラインへの導入など事業レベルでの採用には至っていない。

3次元実装分野の市場動向

Si 貫通配線による 3 次元実装技術は CMOS イメージセンサーの小型化やフラッシュメモリの大容量化等、さまざまな用途に広がっている。2010 年以降は“More than Moore”を実現する多様なデバイスの 1 モジュール化に使われ、2012 年にはメモリとロジック LSI の積層、2014～2015 年にはメモリとロジック LSI に加えてアナログ回路や MEMS までも積層するデバイスが登場すると予想されており、今後も着実に成長していくことが予測されている。世界半導体市場統計 (WSTS) によると、3 次元実装関連世界市場規模として 2011 年 800 億～1000 億ドル、2015 年 1100 億～1500 億ドル、2020 年 2000 億～3500 億ドルと成長が予測されている。

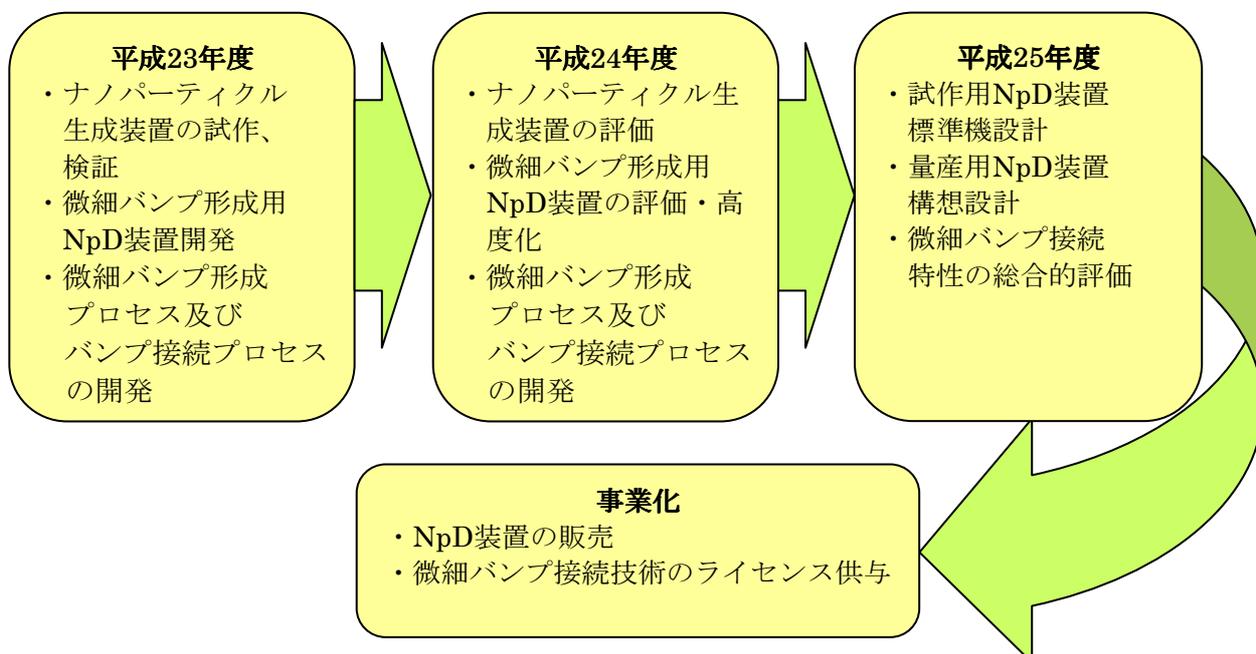
Global Semiconductor sales



研究開発の目的及び目標

本研究開発は、成膜速度と成膜品質、安定性を向上させ、事業レベルでの利用を目指した NpD 装置を開発するとともに、微細な円錐・角錐形状バンプを安定的に形成するプロセスと、微細バンプによる 3 次元 LSI デバイス接続技術の開発を行うことを目的とする。

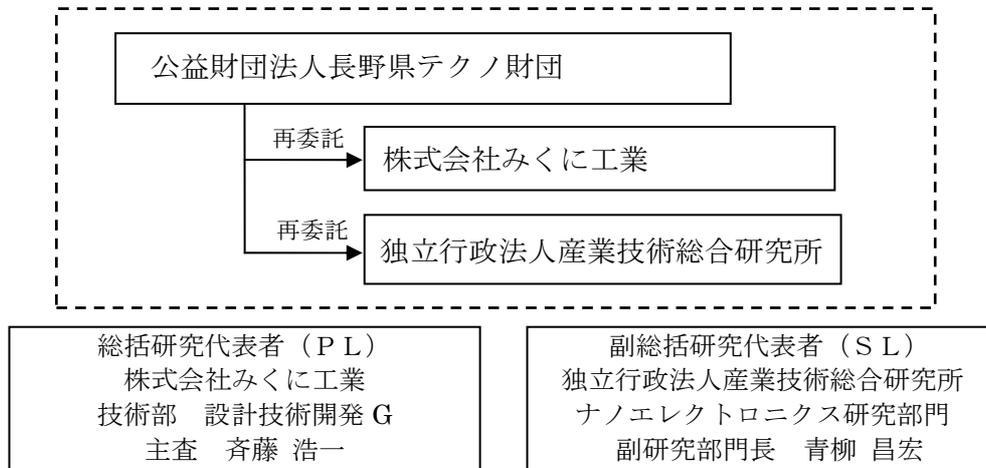
開発した NpD 装置の販売と微細バンプ接続技術のライセンス供与を事業化目標に設定し、3 ヶ年の研究開発計画を立てて進めていく。下に各年度の主な実施項目を示す。



1-2 研究体制

1-2-1 研究組織及び管理体制

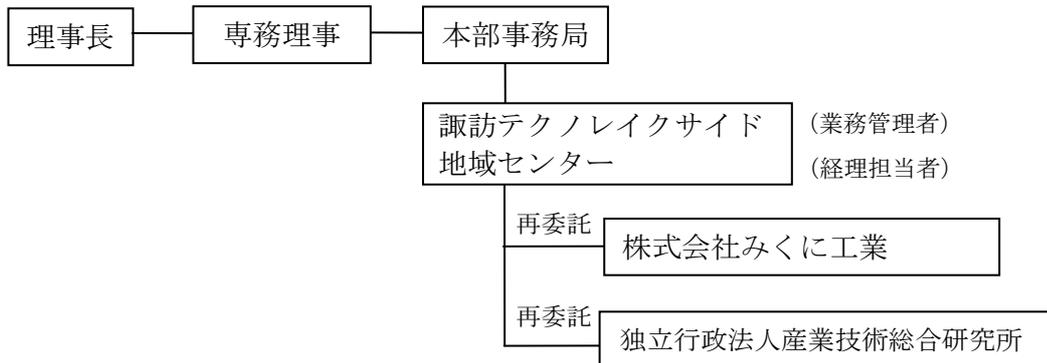
(1) 研究組織（全体）



(2) 管理体制

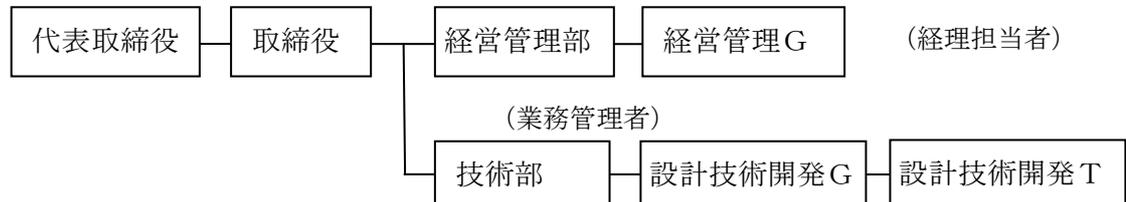
① 事業管理機関

[公益財団法人長野県テクノ財団]

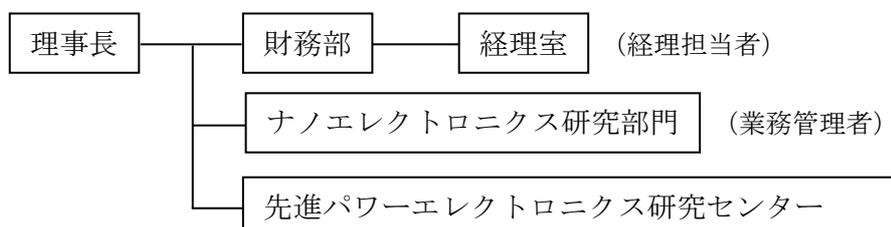


② 再委託先

[株式会社みくに工業]



[独立行政法人産業技術総合研究所]



(3) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 公益財団法人長野県テクノ財団

(管理員)

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
小林 高弘	諏訪テクノレイクサイド地域センター 事務局長	④
岡村 正夫	諏訪テクノレイクサイド地域センター コーディネーター	④
中野 友美	諏訪テクノレイクサイド地域センター 職員	④

【再委託先】

(研究員)

株式会社みくに工業

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
斉藤 浩一	技術部 設計技術開発G 主査	①③
長谷川 弘	技術部 部長	①③
五味 善宏	技術部 設計技術開発G 設計技術開発T 係長	①③
斉藤 伊織	技術部 設計技術開発G 設計技術開発T	①③

独立行政法人産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
青柳 昌宏	ナノエレクトロニクス研究部門 副研究部門長	②
鈴木 基史	ナノエレクトロニクス研究部門 主任研究員	②
渡辺 直也	ナノエレクトロニクス研究部門 主任研究員	②
仲川 博	先進パワーエレクトロニクス研究センター 招聘研究員	②

(4) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

公益財団法人長野県テクノ財団 諏訪テクノレイクサイド地域センター
(経理担当者) 職員 中野 友美
(業務管理者) 事務局長 小林 高弘

(再委託先)

株式会社みくに工業

(経理担当者) 経営管理部 経営管理G課長 中村 元紀
(業務管理者) 技術部 部長 長谷川 弘

独立行政法人産業技術総合研究所

(経理担当者) 総務本部財務部 経理室長 山口 洋二
(業務管理者) ナノエレクトロニクス研究部門長 金丸 正剛

(5) 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
斉藤 浩一	株式会社みくに工業 技術部 設計技術開発G 主査	P L
青柳 昌宏	独立行政法人産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門 副研究部門長	S L
長谷川 弘	株式会社みくに工業 技術部 部長	
山中 忠衛	独立行政法人産業技術総合研究所 イノベーション推進本部 産学官連携推進部 関東産学官連携推進室 イノベーションコーディネーター	アドバイザー
元吉 真	東北マイクロテック株式会社 代表取締役社長	アドバイザー
銅谷 明裕	山一電機株式会社 R&Dセンター長	アドバイザー
小林 高弘	公益財団法人長野県テクノ財団 諏訪テクノレイクサ イド地域センター 事務局長	事務局
岡村 正夫	公益財団法人長野県テクノ財団 諏訪テクノレイクサ イド地域センター コーディネーター	事務局

1-3 成果概要

はじめに、NpD 装置の構成と成膜原理を説明する。

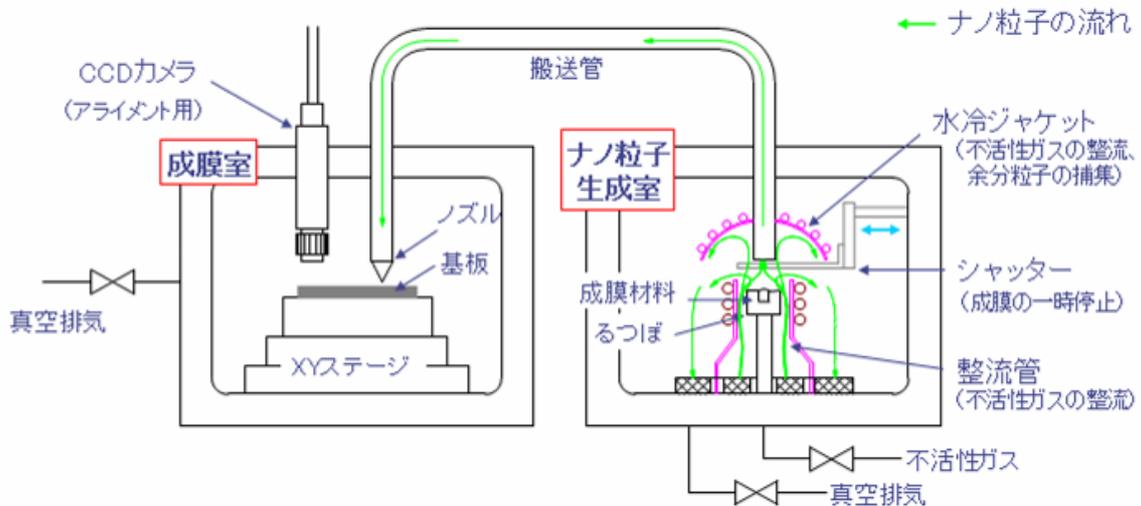


図 1-3-0-1: NpD 装置コンセプトプロトタイプ機 (NP150H) の構成図

NpD 装置コンセプトプロトタイプ機である NP150H の構成図を図 1-3-0-1 に示す。装置の構成は、ナノ粒子を生成する“ナノ粒子生成室”と、ナノ粒子を吹き付けて堆積させる“成膜室”の二つのチャンバーを“搬送管”と呼ばれる細い管で繋いでいる。

この NpD 装置を用いた成膜技術である NpD 法の成膜原理、プロセスは以下のとおりである。

NpD 法の成膜原理

①ナノ粒子の生成

ナノ粒子生成室内にて、不活性ガス中で金属を加熱蒸発させてナノ粒子を生成。
(ガス中蒸発法)

②ナノ粒子の搬送

成膜室内をナノ粒子生成室に対して減圧することで、不活性ガスをキャリアガスとして、ナノ粒子が搬送管を通して成膜室内に流れ込む。

③基板へのナノ粒子堆積

ナノ粒子は不活性ガスと共にノズルで加速されて高速に基板へ衝突し堆積していく。

④膜形成

基板を乗せた XYZ ステージを動かすことで任意の形状の金属膜が形成可能。

NP150H では成膜速度、膜品質に課題があり、安定した円錐・角錐形状バンプの形成が出来なかったことから、安定したバンプ形成が可能であり、導入コストを抑える為に装置価格やランニングコストを低減させた微細バンプ形成用 NpD 装置を開発する。また、開発した微細バンプ形成用 NpD 装置を用いて円錐・角錐形状バンプを安定的に形成するプロセスと、微細バンプによる 3 次元 LSI デバイス接続技術の開発を行う

さらに、微細バンプの量産化に対応する為の、量産化仕様 NpD 装置の開発を行い、要素技術検証のための試作と、量産化仕様 NpD 装置の構想設計を行う。

なお、本事業で開発するバンプの材質は Au (金) とし、NpD 法で使用する不活性ガスは He (ヘリウム) とする。

1-3-1 試作用 NpD 装置標準機の開発

円錐・角錐形状の微細バンプを安定的に作製し、微細バンプ接続技術の研究開発に利用することを目的とした試作用 NpD 装置として、微細バンプ形成用 NpD 装置の開発を行い、成膜速度、品質、安定性、低コスト化等の項目に対し評価を行った。また、開発した微細バンプ形成用 NpD 装置の仕様を基に試作用 NpD 装置標準機の仕様を決定し設計を行った。

< 試作用 NpD 装置標準機の主な仕様 >

分類	項目	仕様	備考
チャンバー配置	(成膜室/ ナノ粒子生成室)	横型	
装置サイズ	本体架台部	(W)1265mm×(D)875mm×(H)1464mm	※突起物を含まず
試料台	試料サイズ	直径 3inch×厚さ 0.5mm ウエハ	
	最大移動速度 (XYZ 軸)	2mm/sec	
アライメント 機構	調整方法	CCD カメラによる手動アライメント	
	カメラ視野範囲	2mm	
	カメラ画素数	500 万画素 CCD	
成膜ノズル	穴径	φ 0.2mm、φ 0.5mm 等	
蒸発源	加熱方式	傍熱型抵抗加熱式	
	最高加熱温度	1700℃	
キャリアガス	使用ガス種	He、N ₂	
成膜能力	成膜速度	20μm/sec	膜中心部の高さ
	膜品質	膜表面への φ 3μm 以上の パーティクルの付着なし	
	成膜安定性	成膜速度ばらつき±5%以内	

1-3-2 微細バンプ形成プロセスおよびバンプ接続プロセスの開発

微細バンプ形成技術およびバンプ接続プロセスの開発を行うとともに、バンプ接続部の評価を行った。

(1) 微細バンプ形成プロセスの開発

バンプ先鋭化原理の解明、厚膜フォトリソグラフィ技術の最適化、バンプ高さ制御技術を確立した。また、微細バンプ形成用 NpD 装置を用いて微細バンプを形成し、バンプ高さばらつきの評価を行った。

- ・バンプ高さばらつき：5%以下達成 (±4.5%)

(2) 微細バンプ接続プロセスの低温化技術開発

接合温度を(樹脂材料の耐熱温度である) 200℃以下にする。

アルゴンプラズマクリーニングによる円錐バンプの表面清浄化により、微細バンプ接続プロセスを、目標の 200℃以下(150℃～200℃)以下まで低温化できた。信頼性に関する懸念点が残っているので、今後検討が必要である。

(3) バンプ接続プロセス条件のデータベース構築

印加荷重と温度に対する円錐バンプの変形量のデータベースを構築した。

1-3-3 量産化仕様 NpD 装置の開発

川下企業からの要求を基に生産機として必要な要素技術仕様の詳細を決定し、その試作、検証を行った。また、この検証結果を基に生産装置として必要な仕様を盛り込んだ量産化仕様 NpD 装置の構想設計を行い、構想図を作製した。

< 量産化仕様 NpD 装置の主な仕様 >

分類	項目	仕様
チャンバー配置	(成膜室/ナノ粒子生成室)	縦型
試料台	試料サイズ	直径8inch ウエハ
	最大移動速度 (XYZ軸)	2mm/sec
ナノ粒子生成室	ナノ粒子生成室材質	SUS316
	ナノ粒子生成室内容積	直径204.3mm×高さ240mm (約7.9L)
成膜室	成膜室材質	アルミニウム合金
	成膜室内容積	490mm×505mm×220mm (約54.5L)
試料交換部	交換方法	試料交換室と搬送ロボットによる自動交換
	交換室容積	直径660mm×高さ150mm (約51L)
	搬送ロボット R 軸 搬送速度	750mm/sec
	動作範囲	最大1050mm
	θ 軸 搬送速度	180°/2.2sec
	動作範囲	360°
	Z 軸 搬送速度	50mm/2.3sec
	動作範囲	±25mm

1-4 当該研究開発の連絡窓口

事業管理者 公益財団法人長野県テクノ財団
 代表者 理事長 市川 浩一郎
 住所 〒380-0928 長野県長野市若里 1-18-1 (長野県工業技術総合センター3F)
 担当者 小林 高弘 (諏訪テクノレイクサイド地域センター)
 連絡先 〒392-8601 長野県諏訪市上川 1 丁目 1644-10
 TEL:0266-53-6000 (内線 2663)
 FAX: 0266-57-0281

再委託先 株式会社みくに工業
 担当者 技術部 設計技術開発G 主査 斉藤 浩一
 連絡先 〒394-8520 長野県岡谷市田中町 2 丁目 8 番 13 号
 TEL: 0266-24-8808
 FAX: 0266-23-9650

再委託先 独立行政法人産業技術総合研究所
 担当者 ナノエレクトロニクス研究部門 副研究部門長 青柳 昌宏
 連絡先 〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1
 TEL: 029-861-5529
 FAX: 029-861-6511

第2章 本論

2-1 試作用 NpD 装置標準機の開発 (実施：株式会社みくに工業)

本節では、円錐・角錐形状微細バンプ試作用 NpD 装置として微細バンプ形成用 NpD 装置の開発を行い、その評価結果を受けて試作用 NpD 装置標準機の仕様を決定し、設計を行う。

2-1-1 微細バンプ形成用 NpD 装置の開発

開発した微細バンプ形成用 NpD 装置の外観を図 2-1-1-1 に示す。

成膜速度、品質、安定性、低コスト化等の項目に対し目標を満たす微細バンプ形成用 NpD 装置が完成した。主な性能評価項目は以下のとおりである。

- (1) 低コスト化
 - ・装置コストの低減
 - ・ランニングコストの低減
- (2) 成膜機能の向上
 - ・成膜速度の向上 目標値：20 $\mu\text{m}/\text{sec}$
 - ・膜品質の向上 目標値：膜表面への $\phi 3\mu\text{m}$ 以上のパーティクルの付着なし
 - ・成膜安定性の向上 目標値：ロット内成膜速度ばらつき $\pm 5\%$ 以内
- (3) サイクルタイムの低減
 - ・ロードロック機構による試料交換作業時間の低減

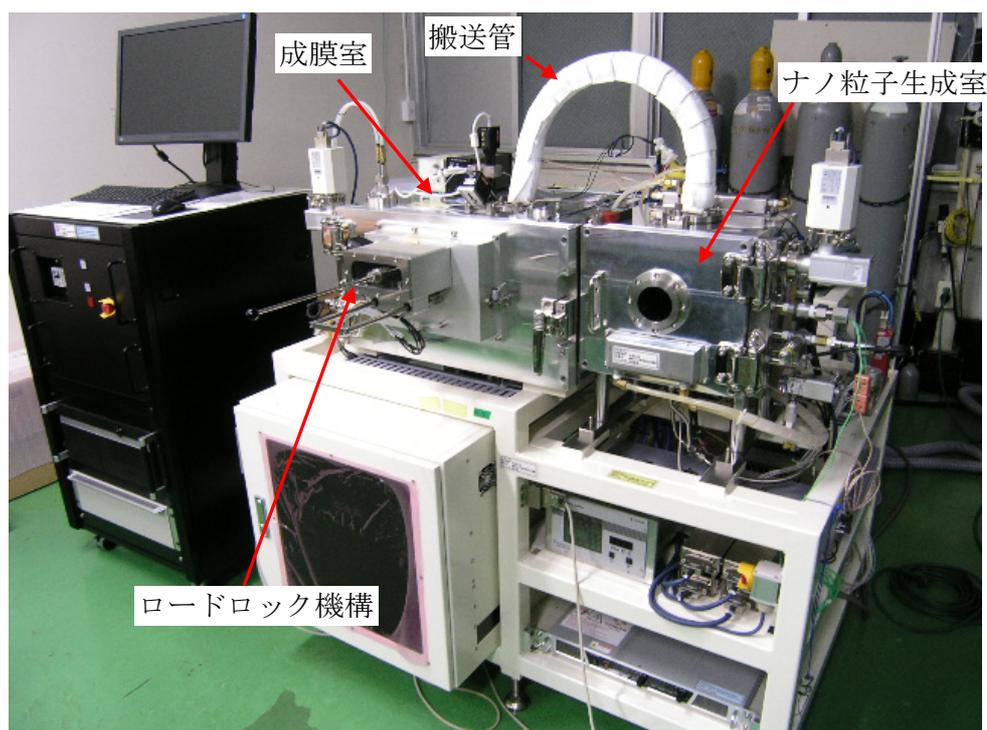


図 2-1-1-1: 高度化後の微細バンプ形成用 NpD 装置外観

(1) 低コスト化

るつぼ加熱方式を従来の高周波誘導加熱装置から、新開発の傍熱型抵抗加熱式ヒータモジュールへ変更することで、電力消費量が従来比 30%削減 (約 2kW \rightarrow 約 0.6kW) できた。装置全体の約 10%を占めている加熱装置の価格も半分以下となり、装置コストの低減にも大きな効果が得られた。

また、キャリアガスとして使用している He ガスの導入流量について、従来はノズルから吐出される流量 (最低消費量) の 300%以上の流量を必要としていたところ、ナノ粒子生成室内構造の最適化により 200%以下でも高品質な膜形成が可能となった。

(2) 成膜機能の向上

微細バンプ形成用 NpD 装置に採用した傍熱型抵抗加熱式ヒータモジュールは当初、熱の伝達効率が悪く、成膜材料である Au の蒸発量が従来装置の 1/10 程度であったが、ヒータ周辺構造の改善を行うことで目標である成膜速度 $20\mu\text{m}/\text{sec}$ が達成できた。

図 2-1-1-2 に Au 成膜時の成膜速度の時間経過を示す。るつぼ温度が設定値に到達した時間を 0 分とし、15 分毎に 10 秒間のスポット成膜を行い、膜厚を計測して成膜速度を算出した。膜厚の測定はキーエンス製レーザ顕微鏡“VK-9710”を用い、膜中心部の最も高い部分を計測した。結果、スタートから 30 分経過後に成膜速度が $20\mu\text{m}/\text{sec}$ に到達した。

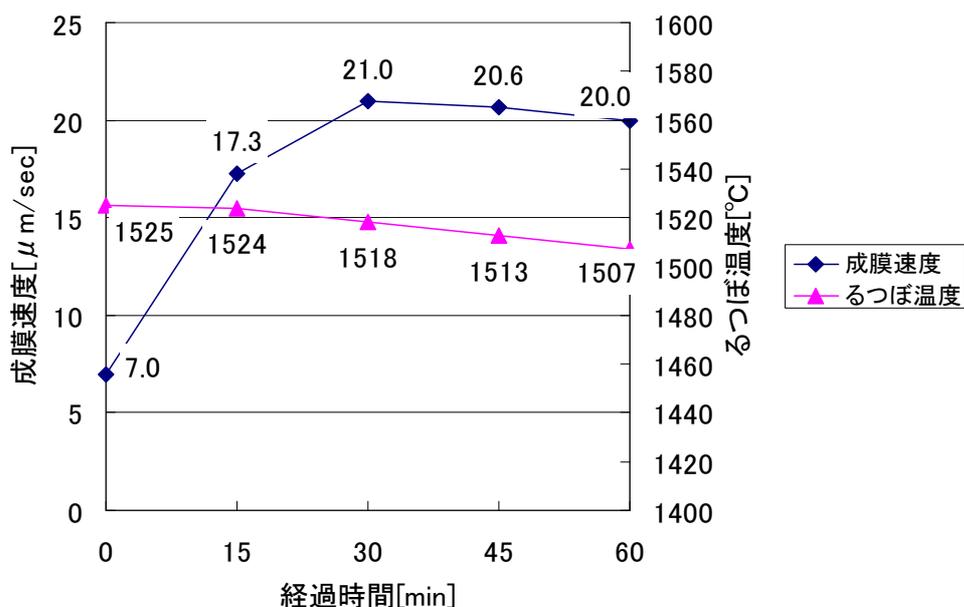


図 2-1-1-2: 成膜速度の時間経過

図 2-1-1-3 に 30 分、60 分後に形成した膜のレーザ顕微鏡による測定画像を示す。 $\phi 3\mu\text{m}$ 以上のパーティクルの付着は全く見られない。

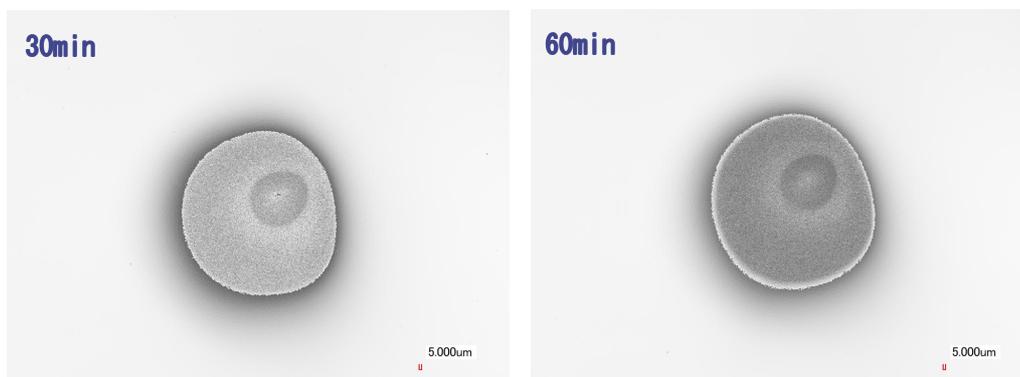


図 2-1-1-3: 30、60min 後に形成した Au 膜のレーザ顕微鏡画像

続いて、ロット内の成膜速度の再現性評価を行った。
 1 プロセス 90 分とし、10 分毎に 10 秒間のスポット成膜を行い、その膜厚から成膜速度を算出し、そのばらつきを評価する。計測結果を図 2-1-1-4 に示す。
 シャッターの影響を無視するために、一回の成膜時間は 10 秒間とした。また、膜厚測定に用いているレーザ顕微鏡の測定精度から、10 秒間で 10 μm 程の厚さになるように成膜速度を調整し、実験を行った。結果、成膜速度のばらつきは 4.24% となり、目標である 5% 以内が達成できた。

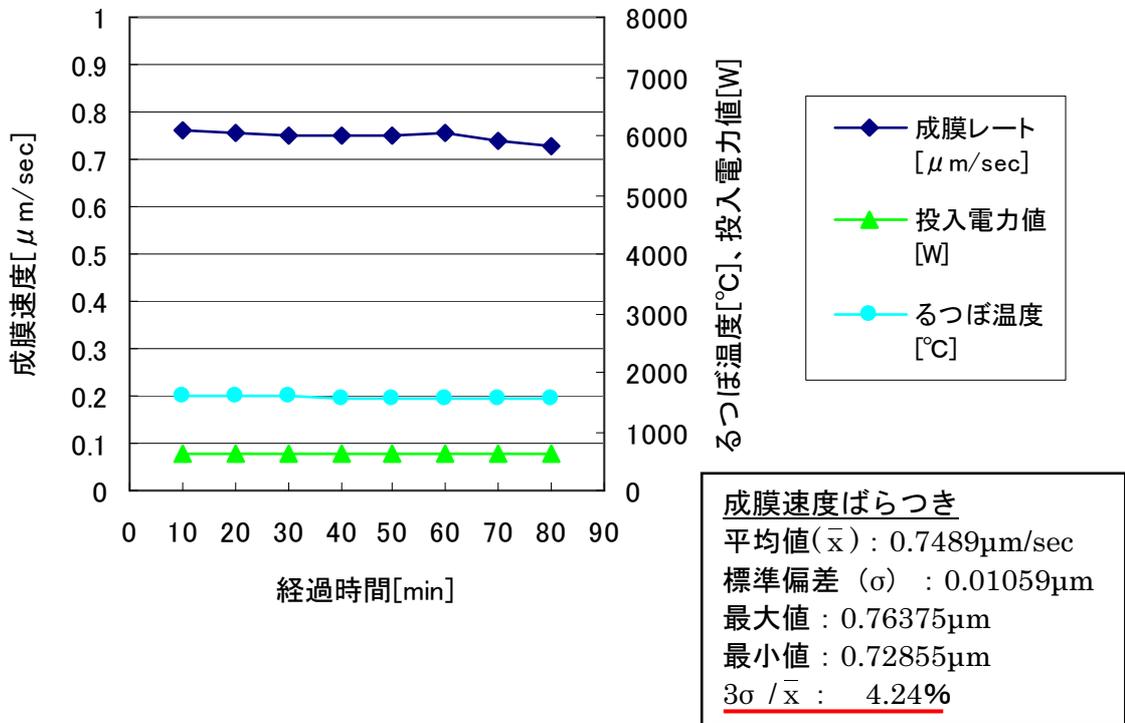


図 2-1-1-4: 成膜速度安定性の評価結果

(3) サイクルタイムの低減

サイクルタイム低減のために、試料交換時間を短縮する。試料交換時に成膜室を大気開放せずに容積の小さい試料交換室を設けることで、真空引き時間を従来比 1/10 以下にした。表 2-1-1-1 に試料交換工程及び計測時間の比較を示す。試料交換工程は増えたが、試料交換時間は全体で従来の試料交換時間に対し 16% にまで短縮できた。

表 2-1-1-1: 試料交換工程及び計測時間の比較

ロードロック機構			従来方式		
試料交換工程	所要時間[sec]		試料交換工程	所要時間[sec]	
①	ゲート開	5.3	①	大気開放	79.7
②	治具取り出し	9.3	②	治具交換	15.0
③	ゲート閉	7.7	③	真空引き (低真空)	94.3
④	副室大気解放	5.0	④	真空引き (高真空)	485.7
⑤	治具交換	27.3			
⑥	副室真空引き	30.7			
⑦	ゲート開	4.3			
⑧	治具セット	12.0			
⑨	ゲート閉	6.7			
合計		108.3	合計		674.7

2-1-2 試作用 NpD 装置標準機設計

開発した微細バンプ形成用 NpD 装置の基本仕様を基に試作用途向けの NpD 装置標準機の仕様を決定して設計を行い、組立図を作製した。

装置の基本原理や装置構成は微細バンプ形成用 NpD 装置の仕様としているが、成膜室の構成（対応試料サイズ、ノズル、ステージ等）は、顧客要求に応じて仕様変更が可能である。図 2-1-2-1 に試作用 NpD 装置標準機の組立図を示す。

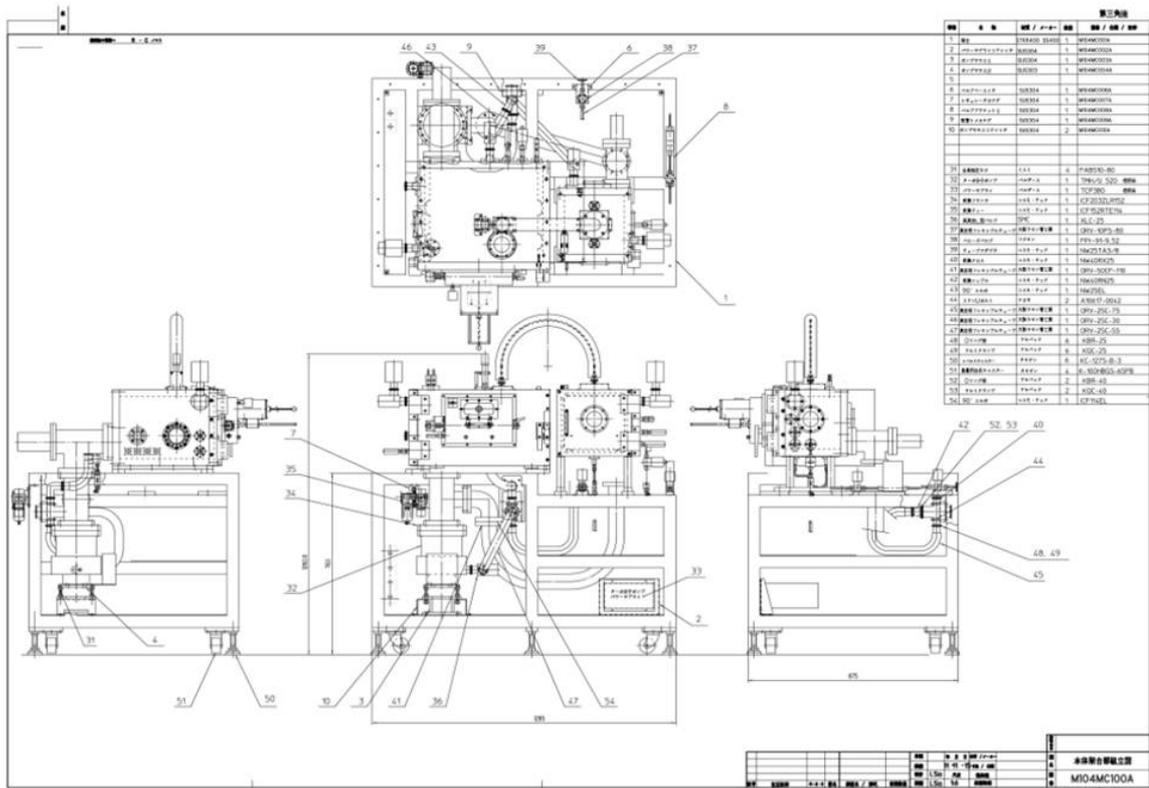


図 2-1-2-1: 試作用 NpD 装置標準機組立図

2-2 微細バンプ形成プロセス及びバンプ接続プロセスの開発

(実施: 独立行政法人産業技術総合研究所)

本節では、微細バンプ形成技術およびバンプ接続プロセスの開発を行うとともに、バンプ接続部の評価を行う。

2-2-1 微細バンプ形成プロセスの開発

図 2-2-1-1 に、微細バンプ(Au 円錐バンプ)の形成工程を示す。Au 円錐バンプは、基本的には、(a) 厚膜レジストのフォトリソグラフィ、(b) ナノパーティクルデポジション、(c) リフトオフ、の3段階で形成している。厚膜フォトレジストのフォトリソグラフィ技術を最適化し、テストチップ上に円錐形状バンプを形成した。形成した微細バンプの数は 10 mm 角チップ上に 10012 個であり、ピッチは 20 μm である。

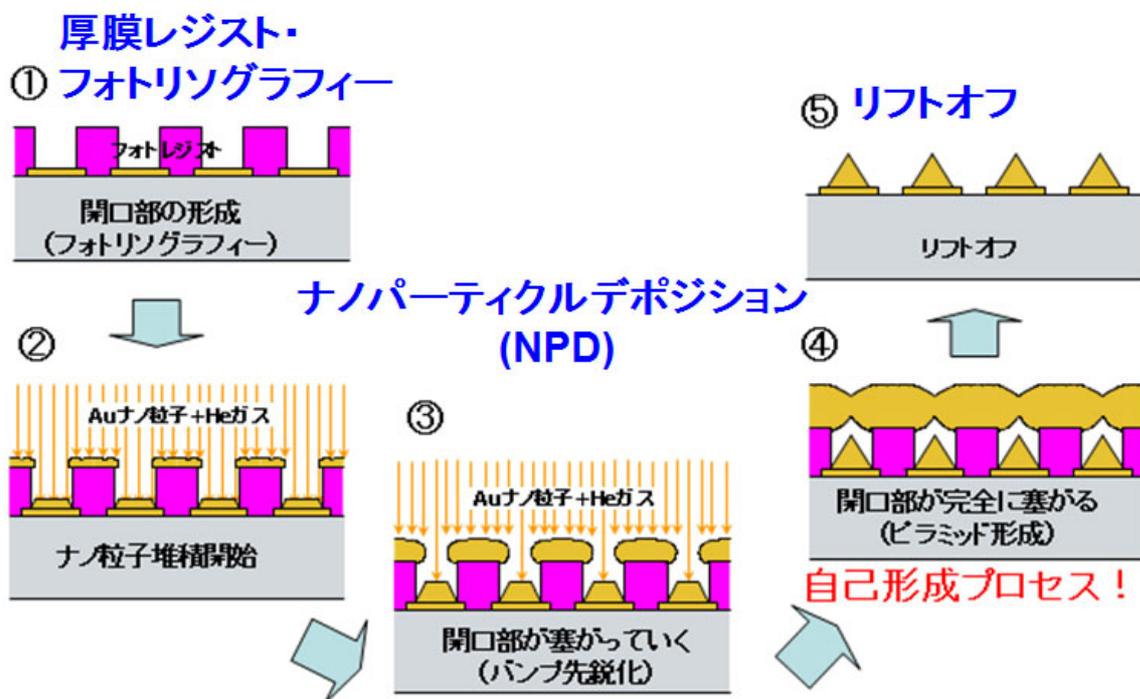


図 2-2-1-1: Au 円錐バンプの形成工程。まず、厚膜レジストのフォトリソグラフィ技術によって、レジスト開口部を形成する。その後、Au ナノ粒子の堆積を開始すると、Au ナノ粒子が縦方向だけでなく、横方向にも堆積成長する為、開口部が Au ナノ粒子で塞がってき、それに伴って、開口部内のバンプは次第に先細り状になっていく。開口部が完全に塞がると、開口部内部への Au ナノ粒子の堆積が止まる。最後に、レジストを溶剤で溶解し、不要な金属膜を除去することで、Au 円錐バンプが得られる。

図 2-2-1-2 に形成した良品バンプの走査型電子顕微鏡像 (SEM: Scanning Electron Microscope) 像を示す。作製した 20 個のうち、良品 1 個、準良品 (円錐形状のバンプが形成されているが、バンプ底面部にパーティクルが付着しているもの) 5 個、不良品 14 個となり、歩留まりは 5% であった。主な不良は、Au ナノ粒子の凝集体が NpD 時にレジス開口部に付着する、レジストへの熱ダメージの発生により、レジストにしわ (レジスト開口部の変形) が生じる、ことよって発生する。評価は、良バンプ、準良バンプを用いることとした。

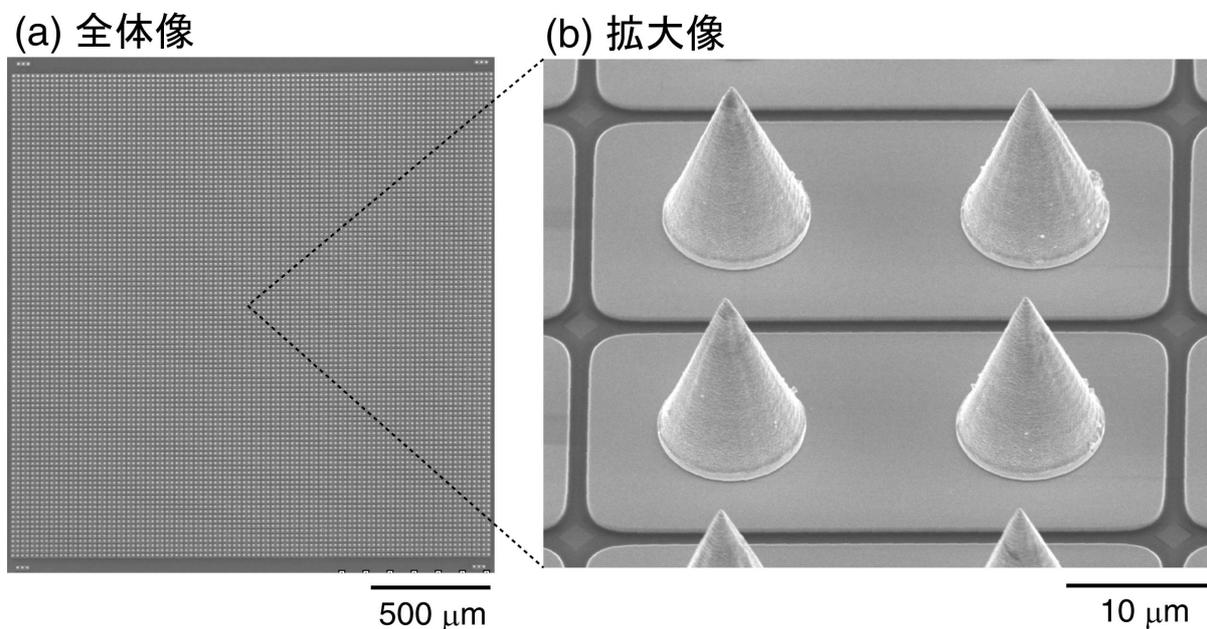


図 2-2-1-2: 良バンプの SEM 像。Au 円錐バンプの直径は 10μm、高さは約 12.6 μm であった。

図 2-2-1-3 に、良品チップの Au 円錐バンプの高さのヒストグラムを示す。これらを見ると、円錐バンプの高さの平均値 μ は 12.6 μm、標準偏差 σ は 0.19 μm で、高さばらつき ($3\sigma/\mu$) は 4.5% であり、目標値の $\pm 5\%$ 以下になっていることが分かる。

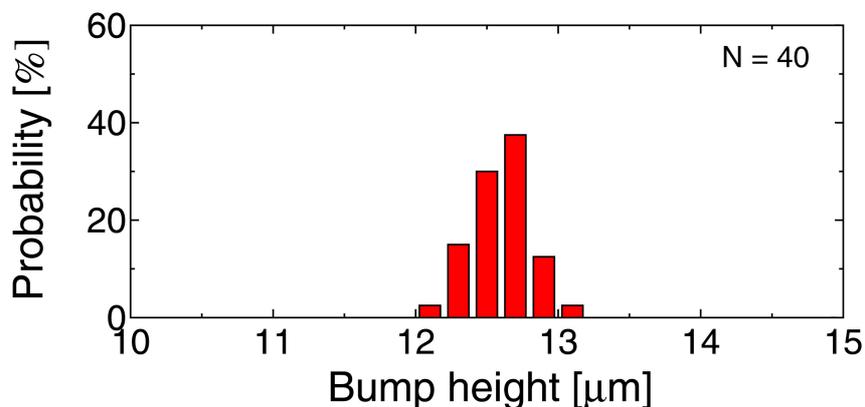


図 2-2-1-3: 円錐バンプの高さのヒストグラム。試料数は 40 である。円錐バンプの高さの平均値は 12.6 μm、標準偏差は 0.19 μm である。

2-2-2 微細バンプ接続プロセスの低温化技術開発

既存の成膜法(スパッタ、蒸着、めっきなど)で形成された Au バンプの表面には、大気中では、炭素や酸素などの吸着膜が付着している。高温接続の場合には、Au 原子間の相互拡散が起こるために、バンプ表面に多少の吸着膜があっても Au-Au 接合部が形成されるが、低温接続の場合には、Au 原子間の相互拡散がほとんど起こらないために、この吸着膜の状態が、バンプ接続実現の成否を決める。よってバンプ接続を行う前に、Ar プラズマクリーニングを導入し、円錐バンプ接続プロセスの低温化を試みた。バンプ接合条件を表 2-2-2-1 に示す。

表 2-2-2-1: 円錐バンプの接合条件

加圧	100 N
温度	100~250°C
時間	30 s
チップサイズ	10 mm 角
基板サイズ	14 mm 角

図 2-2-2-1 に、円錐バンプの接続抵抗の接合温度依存性を示す。Ar プラズマクリーニングを行わなかった場合には、接続温度 150°C までしか導通確認ができないのに対し、Ar プラズマクリーニングを行った場合には、100°C まで低温化しても導通確認ができる。また、Ar プラズマクリーニングを行なった試料の方が、接続抵抗値が若干低いことが分かる。これらのことは、Ar プラズマクリーニングが、円錐バンプの低温接続に有効であることを示唆している。

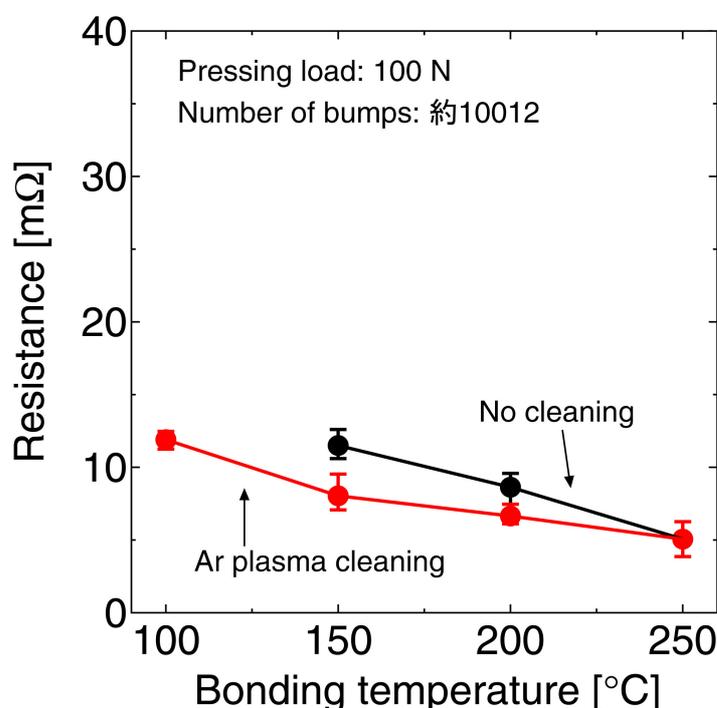


図 2-2-2-1: 円錐バンプの接続抵抗の接合温度依存性。Ar プラズマクリーニング実施時と未実施時を比較した形で表示している。エラーバーは、4箇所における接続抵抗の最大値と最小値を表している。また、Ar プラズマクリーニングなし・接続温度 100°C の試料は、接続失敗している。

次に、積層チップの機械強度を評価するために、チップシェア試験を行った

図 2-2-2 に、シェア強度の接続温度依存性を示す。Ar プラズマクリーニングを行わない場合には、250°Cでも 60 N 程度であるが、Ar プラズマクリーニングを行った場合には、150°C~200°Cで 60 N を達成している。この結果は、Ar プラズマクリーニングの導入が、円錐バンプの接続プロセスの低温化(200°C以下)に有効であることを示唆している。

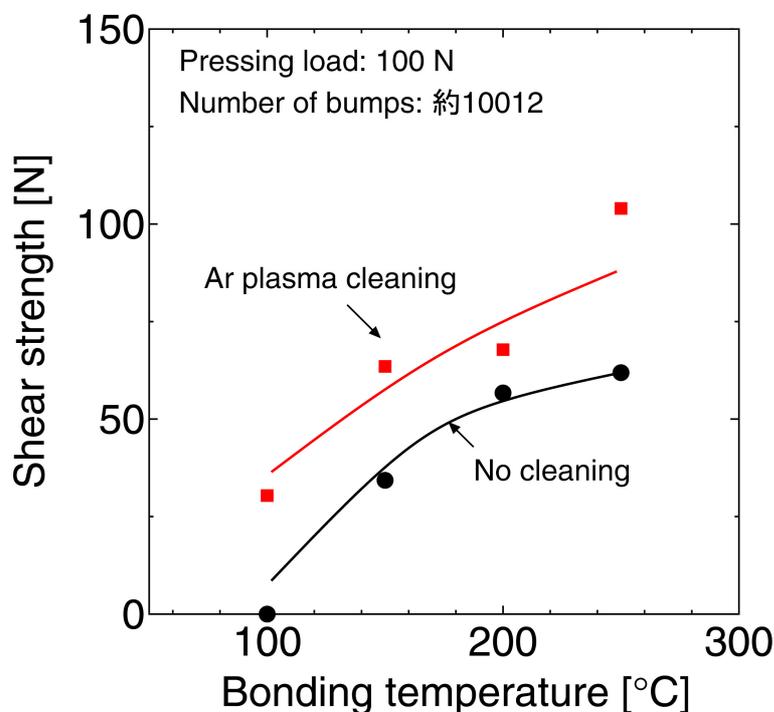


図 2-2-2-2: シェア強度の接続温度依存性。Ar プラズマクリーニング実施時と未実施時を比較した形で表示している。

Ar プラズマクリーニングを行うことにより、円錐バンプの接続プロセスの低温化(200°C以下)ができたといえるが、以下のような懸念点があるので、今後検討が必要である。

- (1) 低温化した場合には、Au 円錐バンプの変形量(潰れ量)が小さくなるために、接合面積が小さくなり、接続抵抗が若干大きくなるので注意が必要である。
- (2) Au 円錐バンプの硬度が大きいために、Ti-Au 電極の内部までめり込む形で接合しており、Ti-Au 電極の下層に機械的に脆弱な Low-k 膜などが配置されている場合には、Low-k 膜の破壊の恐れがあり、これについても注意が必要である。
- (3) 熱サイクルテストなどの信頼性試験を実施していないので、実施する必要がある。

2-2-3 バンプ接続プロセス条件のデータベース構築

バンプ接続プロセス条件のデータベースとして、荷重/接続温度と円錐バンプ変形量の関係进行调查した。調査を簡便に行うために、円錐バンプ単体に対して温度と荷重を印加しながら、円錐バンプ変形量を調査した。図 2-2-3-1 は、得られた荷重/接続温度と円錐バンプ変形量の関係である。これより、バンプ接続後のチップ間ギャップや接続抵抗などを制御可能となると考えられる。

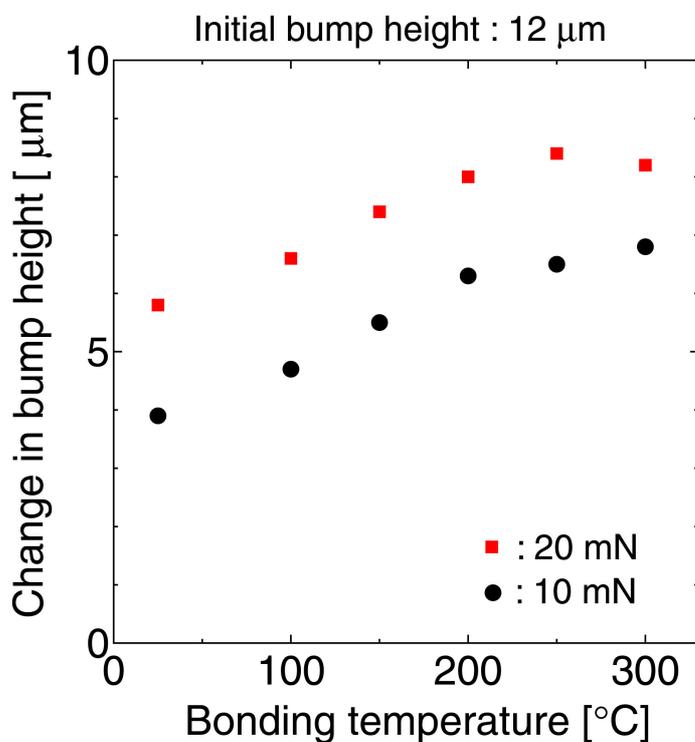


図 2-2-3-1: 荷重/接続温度と円錐バンプ変形量の関係。円錐バンプの初期高さは 12 μm である。

2-3 量産仕様 NpD 装置の開発（実施：株式会社みくに工業）

本節では、川下企業からの要求を基に生産機として必要な要素技術仕様の詳細を決定し、その試作、検証を行う。また、この検証結果を基に生産装置として必要な仕様を盛り込んだ量産化仕様 NpD 装置の構想設計を行い、構想図を作製する。

2-3-1 量産化仕様 NpD 装置の要素技術試作、検証

(1) 要素技術開発項目の決定

川下企業の主な要求は以下のとおりである。

- ①成膜の安定性向上（巨大粒子発生メカニズム制御）
- ②成膜材料の搬送効率向上
- ③操作性向上
- ④大径ウエハ対応
- ⑤複数チップを並べて成膜
- ⑥Bump 形成の低温化

これらの要求に対応する要素技術について、要求①③⑤⑥は微細バンプ形成用 NpD 装置、要求②④はナノパーティクル生成装置を用いて検証を行った。図 2-3-1-1 にナノパーティクル生成装置の外観を示す。要求④のウエハ対応についてはステージ機構の見直しによって、微細バンプ形成用 NpD 装置の成膜室（50.3L）の約半分の容積（26L）で 3 インチウエハに対応可能とした。

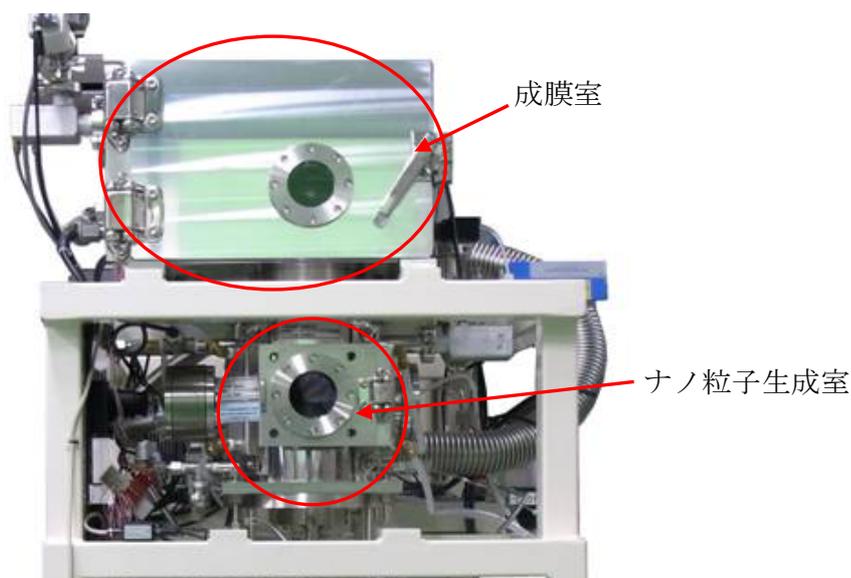


図 2-3-1-1: ナノパーティクル生成装置外観写真

要求②の成膜材料の搬送効率向上については成膜室とナノ粒子生成室を縦積みにして搬送経路を短縮し、さらにナノ粒子生成室内に導入した He ガスを整流する機構を製作し、評価を行った。結果を表 2-3-1-1 に示す。従来装置からは大幅に向上しているが、目標の 90%は未達成であるため、今後も継続して整流機構の最適化を進めていく。

表 2-3-1-1 搬送効率測定結果の比較

装置	搬送効率測定結果
従来装置 (NP150H)	10%
ナノパーティクル生成装置	54.4%

2-3-2 量産仕様 NpD 装置の構想設計

量産仕様 NpD 装置の要素技術試作、検証結果を受けて構想する量産仕様 NpD 装置の仕様をまとめ、この仕様を基に量産仕様 NpD 装置の構想設計を行い、構想図を作製した。

作製した構想図を図 2-3-2-1 に示す。試作用 NpD 装置とは異なり、成膜室をナノ粒子生成室の上に置く、縦型の構造とした。縦型構造は横型に比べて汎用性には劣るが、ナノ粒子の搬送効率をより高めることができることから、専用機となる量産仕様の装置向けの構造である。また、成膜室は 8 インチウエハ対応であり、成膜室へ試料を自動で給材するロボットを組み込んだ試料交換室を設置した。

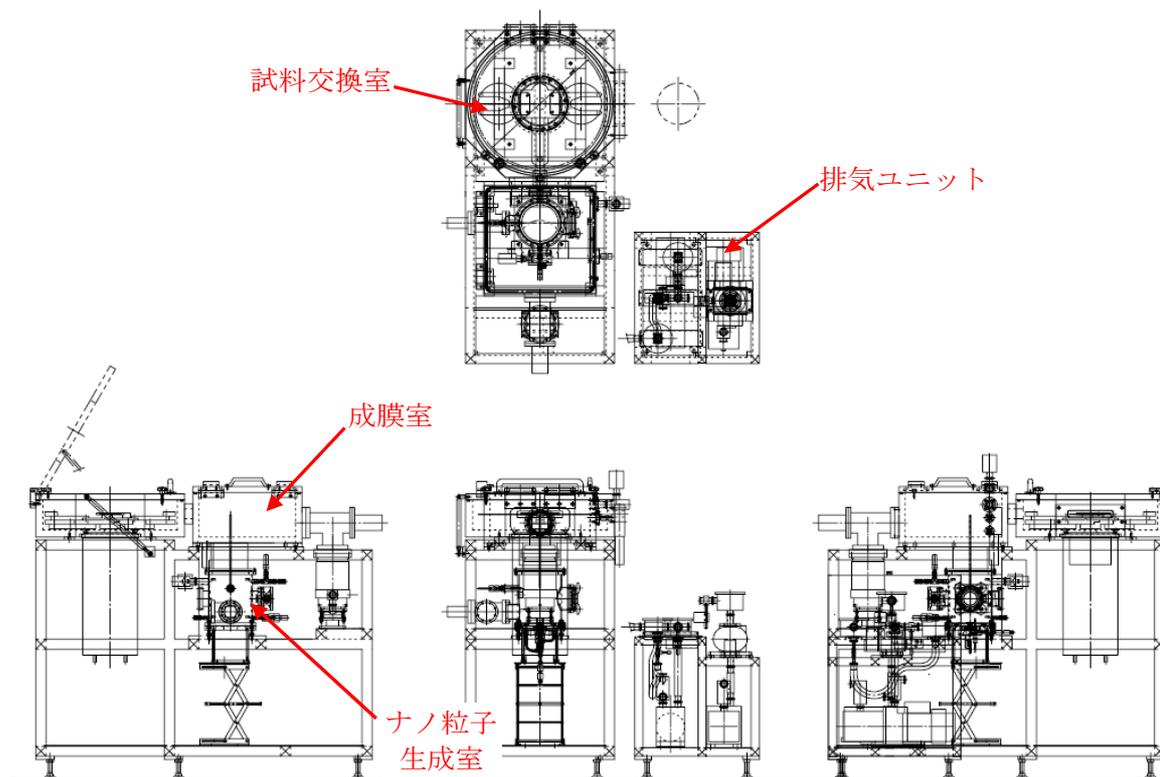


図 2-3-2-1: 量産仕様 NpD 装置の構想図

第3章 全体総括

本研究開発では、平成23年度から平成25年度までの3年間、微細バンプ形成用ナノパーティクルデポジション装置の成膜速度と成膜品質、成膜安定性を向上させ、事業レベルでの利用を目指した装置を開発するとともに、微細な錐形状バンプを安定的に形成するプロセスと、微細バンプによる3次元LSI接続技術の開発を推進した。各年度の研究開発成果は以下の通りである。

平成23年度は、まずナノ粒子生成室の最適化を検証するためのナノパーティクル生成装置を製作し、るつぼ加熱方式として傍熱型抵抗加熱方式を採用した。またコンパクトで低コスト化を目指した微細バンプ形成用NpD装置の設計・製作を行った。さらにバンプ高さ制御を行うため厚膜フォトレジストパターンプロセスの開発を行った。

平成24年度には、るつぼ加熱の性能評価を行い、傍熱型抵抗加熱方式の課題が明らかになった。微細バンプ接続プロセスの開発ではプラズマクリーニングにより200℃以下での低温接続が可能になった。さらに、荷重・温度に対するバンプ変形量を調査しバンプ接続プロセス条件のデータベースを構築した。量産用NpD装置の構想としてはナノ粒子搬送効率50%を見込む構想図を作成し、また量産ラインへの装置導入を想定した自動化対応機構の構想設計を行った。

平成25年度は傍熱型抵抗加熱方式による蒸発量低下の課題を解決し、成膜品質と合わせて改善を確認、目標を達成し、試作用NpD装置標準機の設計を行った。また、川下企業からの要求を基に生産機として必要な要素技術項目及び仕様の詳細を決定して、試作検証を行い、量産仕様NpD装置の設計を行った。微細バンプ形成プロセスおよびバンプ接続プロセスの開発では、開発した微細バンプ形成用NpD装置で形成した微細バンプの総合的評価を行い、バンプ高さばらつきを±5%以内に抑えることができた。

3年間の成果をまとめると、当初掲げた以下の目標について達成することができた。

【1】微細バンプ形成用NpD装置の開発

- ・ 成膜速度の向上：20 $\mu\text{m}/\text{sec}$ （従来：10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ ）
- ・ 膜品質の向上：膜表面への ϕ 3 μm 以上のパーティクルの付着なし
- ・ 繰り返し成膜時の再現性：成膜速度 $\pm 5\%$ 以内
- ・ 不活性ガス消費量の低減：最低消費量の200%以下（300%以上 \rightarrow 100%）
- ・ 電力消費の低減：従来比30%削減（約2kW \rightarrow 約0.6kW：1/3以下）
- ・ サイクルタイム低減：試料交換作業時間従来装置の50%以下（約60分 \rightarrow 30分以下）

【2】微細バンプ形成プロセスおよびバンプ接続プロセスの開発

- ・ 厚膜フォトレジストのフォトリソグラフィ技術の最適化：10 μm 厚以上
- ・ バンプ高さ制御：高さばらつき $\pm 5\%$ 以内
- ・ 接合温度低減：200℃以下
- ・ バンプ接続プロセス条件のデータベースを構築

【3】量産化仕様NpD装置の開発

- ・ 製造ラインへの導入を想定した装置構成：試料設置取出しの自動化対応機構の構想図作製

一方で、ナノ粒子搬送効率90%以上、低温接合での信頼性確認についてはそれぞれ目標達成に至らなかった。また搬送経路からの凝集体改善、レジスト熱ダメージ改善などの課題も残っており今後の継続研究が必要である。

本研究開発成果の事業化は2015年頃を目指しており、既にサンプル試作を受注し出荷を始めている。事業化のアプリケーションとしてはピクセル型放射線検出器、積層型イメージセンサー、医療用センサー等の少量高付加価値用途を中心に考えており、川下企業との打合せ、試作等進めることでニーズを的確に反映した開発を行い、事業化展開に向けた活動を行っていく。