

3次元 LSI 実装のための TSV 技術の研究開発動向

LSI 製造プロセスの微細化がもたらす高集積化によって、コンピュータを始めとした電子機器はこれまで、小型化、多機能化、高速化などの高性能化を果たしてきた。この微細化には技術的な限界が見えてきており、この限界を打開する技術として、シリコン貫通電極（TSV）を用いた3次元実装技術（TSV 技術と呼ぶ）に期待が寄せられている。TSV 技術は、従来の微細化の追求に代わる実装技術のひとつとして注目されているが、さらに、複数の異種 LSI チップや MEMS を混載して多機能 LSI を実現できる点でも、期待が寄せられている技術である。

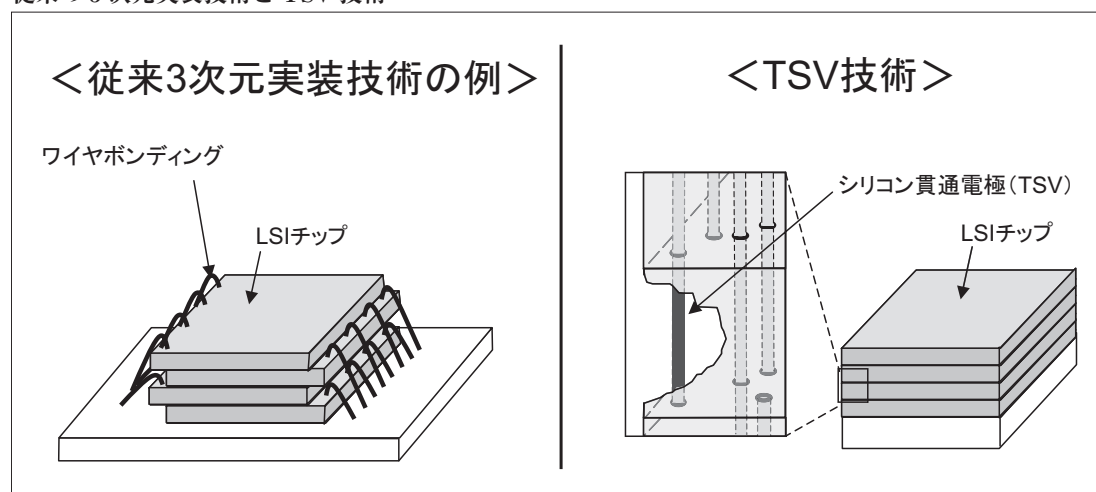
我が国では、他国に先行して TSV 技術の実用化研究が行われ、製品化でも先行してきたが、これらの事例はまだ TSV 技術の小規模適用にすぎず、適用のメリットも小型化と高密度化を主としたものである。現在は、動作の高速化、省エネ化、多機能・高性能化など、TSV 技術の複数のメリットを最大限に生かした、より高度な TSV 技術の実用化を目指して、設計手法の見直しにまで及ぶような研究・開発が世界中で行われている。

一方で、TSV を形成するための基本製造技術、TSV 技術を適用するための周辺技術、および、TSV 技術を高度に利用するための設計技術など、解決すべき課題は広範にわたっている。

世界各国は、TSV 技術の実用化を見据えた研究プロジェクトを開始するなどの対応を図っているが、各国のプロジェクトを概観すると、TSV 技術の基本技術とその応用の研究開発に余念のない米国の拠点、EDA（Electronic Design Automation、設計自動化）ツールの新規開発と技術適用の将来展望を持って TSV 技術の実用化にも力を入れている欧州の拠点、基礎技術を有しながら TSV 技術適用の実用試作に注力している欧米韓連合のコンソーシアム、周辺技術などを抑えて実用化に取り組む日本のコンソーシアム、という違いが窺える。

これらは総じてグローバルな連携を志向した動きであり、最先端の LSI 開発技術の進め方として、グローバルな連携というキーワードは注目していく必要があろう。

従来の3次元実装技術と TSV 技術



科学技術動向研究センターにて作成

3次元 LSI 実装のための TSV 技術の研究開発動向

吉永 孝司
情報通信ユニット

野村 稔
客員研究官

1 はじめに

LSI 製造プロセスの微細化がもたらす高集積化によって、コンピュータを始めとした電子機器はこれまで、小型化、多機能化、高速化などの高性能化を果たしてきた。しかし、トランジスタの発熱を伴うリーク電流の増大や、配線における信号遅延などが課題となって、さらなる微細化へは、技術的な限界が見えてきた。平面での微細化限界を打開する技術のひとつに、平面での微細化によらず高集積化をはかることができる3次元実装技術がある。従来は2次元平面上で実現されていたLSI

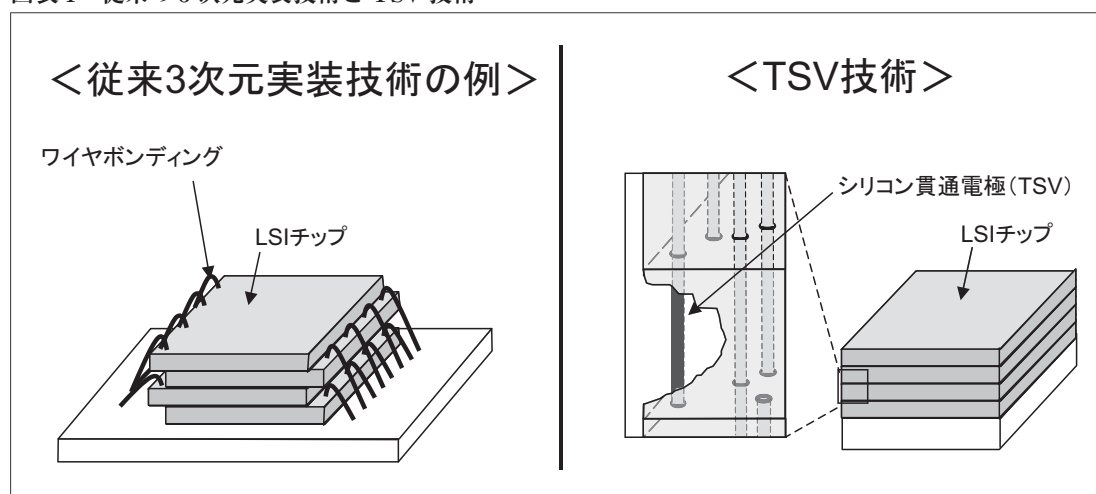
チップを縦方向に積層することで、そのLSIが有していた機能を変え、ことなく、実装面積を減らしたLSI部品を作ることができる。

この3次元実装の開発の鍵は、積層されたLSIチップ間の電気信号をいかに接続するか、という電気的な実装技術にある。これまでの主要な実装技術は金属細線を使ったワイヤボンディングであったが、近年になり、この有線接続に代わる接続方法の研究が進められている。そのひとつは、ワイヤボンディングの配線スペースを無くし、無線でデータ通信を行う接

続方法の提案である^{1~4)}。また、同様にワイヤボンディングの配線スペースを無くし、より短い配線で有線接続する方法として、シリコン貫通電極(TSV: Through-silicon via)を使った実装技術(以下、TSV技術と呼ぶ)が研究されている^{5~7)}。TSV技術は、これらの3次元実装技術の中で、実用化において他に先行している^{8, 9)}。

ここでは、3次元実装技術の中でTSV技術を取り上げ、技術の特徴を紹介し、実現に必要な技術課題とそれを支える研究体制について述べる。

図表1 従来の3次元実装技術とTSV技術



科学技術動向研究センターにて作成

2 シリコン貫通電極 (TSV) 技術とは

2-1

3次元実装技術の中の TSV 技術

3次元実装は実装密度を高める技術として、これまで、ワイヤボンディングなどを用いた電気接続による実装が行われてきた。3次元実装技術のさらに進んだ姿として、より実装密度を高めた TSV 技術がある(図表2)。

TSV 技術とは、LSI チップを積層し、この LSI チップを貫通する縦配線となるシリコン貫通電極 (TSV) を用いて LSI チップ相互間の回路接続を行い(図表1)、1つの LSI 部品として外装ケース (package) に実装する技術である。TSV 技術は、従来の微細化の追求に代わる実装技術のひとつとして注目されているが、さらに、複数の異種 LSI チップや MEMS を混載して多機能 LSI を実現できる点

でも、期待が寄せられている技術である。

我が国では、1998 年当時の通商産業省の支援で発足した実装技術研究プロジェクトとして、技術研究組合 超先端電子技術開発機構 (ASET) が主体となり、3次元高密度集積化技術としての TSV 技術の開発が他国に先行して始められた¹⁰⁾。産業界では、2007 年に(株)東芝が携帯電話など向けのカメラモジュールに、世界で初めて TSV ((株)東芝では TCV: Through Chip Via と呼んでいた)技術を採用して 64% のサイズダウンを果たし話題を呼んだ⁸⁾。その後、エルピーダメモリ(株)が 8 枚の LSI メモリチップを積層してメモリ容量を 8 倍にした DRAM 開発の完了を報告している⁹⁾。

このように、近年になって TSV 技術の実用化に関する発表が相次いでいるが、これらの事例はまだ TSV 技術の小規模適用にすぎず、適用のメリットも小型化と高密度

化を主としたものである。現在は、TSV 技術の複数のメリットを最大限に生かした、より高度な TSV 技術の実用化を目指して、設計手法の見直しにまで及ぶような研究・開発が世界中で行われている。

2-2

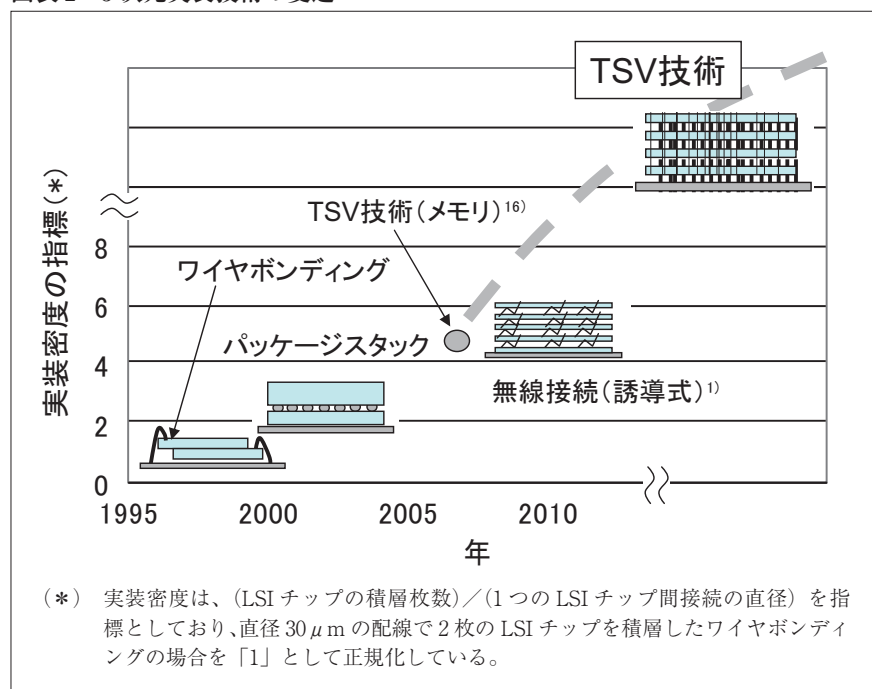
二つの方向性から見る TSV 技術

LSI の小型・高密度化の手法は、SiP (System in package) と呼ばれる実装技術を使う手法と、LSI の設計手法である SoC (System on a chip) を利用する方法の 2 つに大別される。SiP 技術は、それぞれ個別に製造された LSI チップを複数個組み合わせ、それを 1 つの外装ケースに実装して外部接続端子を付け、1 つの LSI 部品として完成させる実装技術である。一方、SoC は、機能回路ブロックなどを含む論理回路を LSI チップ内に集積して 1 つの LSI 部品にまとめあげるといふ、LSI の設計手法である。以下、TSV 技術を、これら 2 つの方向性から説明する。

(1) SiP 技術の延長にある TSV 技術

SiP 技術は、複数の LSI 間をワイヤなどで接続する技術を基本技術としている。3次元実装技術における SiP 技術は、デジタルカメラや携帯電話などの小型・高密度実装において多用されている。図表3は SiP 技術の延長にある TSV 技術を示している。SiP 技術では、異なる機能を持つ LSI チップを縦積みや横置きにし、インタポーザ (LSI チップの配線を接続するための中継基板) を使って、ワイヤボン

図表2 3次元実装技術の変遷



科学技術動向研究センターにて作成

ディングなどで LSI チップ間を電氣的に相互接続し、1つの LSI 部品として完成させている(図表3左上)。これに対して、異なる機能の LSI チップを縦積みし、LSI チップ間を、ワイヤボンディングの代わりに TSV で電気接続する 3次元実装技術が TSV 技術である。2-1 項のカメラモジュールやメモリ積層の例はこの方向性にあり、さらに高密度化させる将来の技術として、異種の LSI チップの混載(ヘテロジニアス LSI)、あるいは LSI チップ

と MEMS などを混載した LSI 部品への応用が考えられる。

(2) SoC の発想転換による TSV 技術

図表4は、もともと2次元の設計手法であった SoC を3次元に発想転換し、3次元実装を実現する例を説明している。2次元平面において1つの LSI チップでできていた論理回路をサブ論理回路群に分割し、2次元レイアウトから3次元レイアウトに変えるという発

想である。2次元面積を減らして同等の機能を実現できるということで、小型・高密度化に関して、LSI の微細化と同等の効果が得られる。このような実例はまだ現れていないが、高密度実装のロジック LSI 部品などで実現するだろうと考えられる。

2-3

TSV 技術を適用するメリット

以下に、TSV 技術を適用することで得られるメリットを、従来の実装技術との対比で示す。

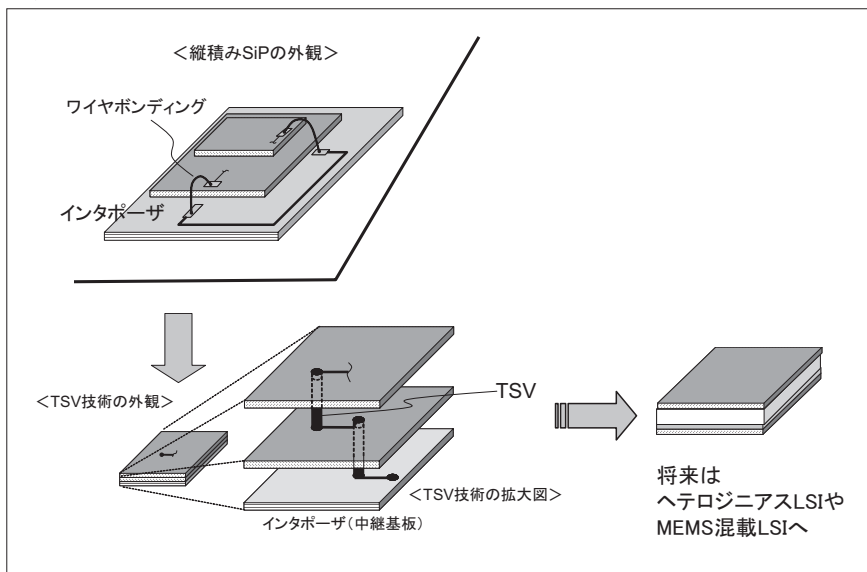
(1) 小型化・高密度化

図表3および図表4に例示したように、TSV 技術を使うと、まず LSI 部品を小型化できる。SiP 技術でも縦積み実装は行われてきたが、LSI チップの外側へ張り出したワイヤボンディングをなくせることで、さらに小型化できる。また、「SoC の発想転換」という方向性では、平面での構成から縦積み実装に変えることで、1つの LSI の面積を数分の一程度に小型化できる。一方、高密度化という意味では、例えば CPU 内の多数のプロセッサ・コア回路を多段実装して、並列処理プロセッサ(many core processor)の LSI 部品として実現する技術などに有効に使えるとの報告がある。

(2) 信号伝送と処理速度の高速化

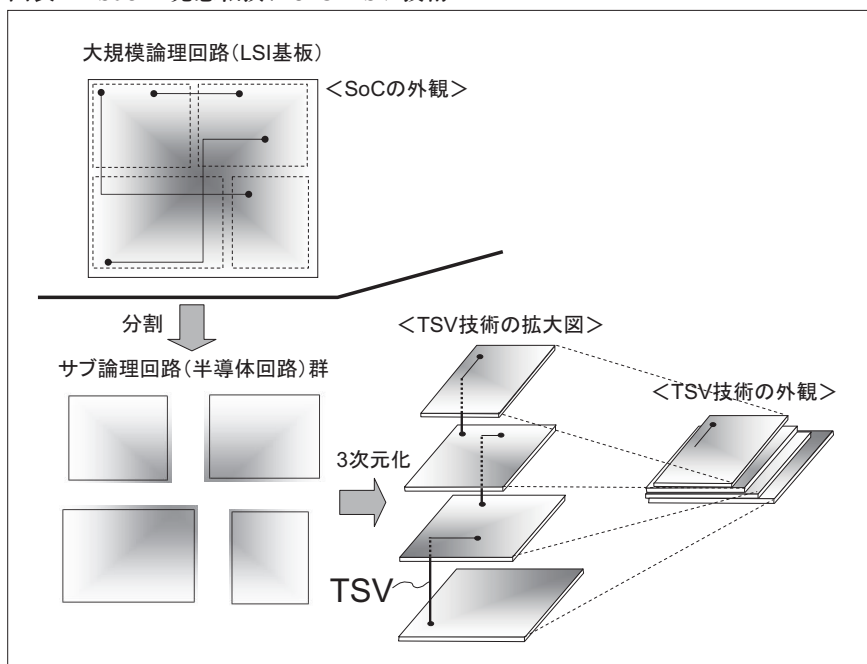
図表3および図表4に例示したように、2次元実装で長くなる配線の全長を、TSV 技術を使うことで短くできる。配線が短いと信号は速く伝わり、遅延の原因となる配線相互の干渉も少なくなるため、伝送速度の高速化を図ることができる。また、高速のデータ伝送を繰り返す LSI チップを縦積みし、

図表3 SiP 技術の延長にある TSV 技術



科学技術動向研究センターにて作成

図表4 SoC の発想転換による TSV 技術



科学技術動向研究センターにて作成

その間の接続を TSV で行うと、LSI チップのレイアウトの自由度が高まり、配線長を短くでき、高速化を図ることができる。これをスーパーコンピュータ用の LSI に適用し、演算部とメモリ間のデータ転送を高速化すると、現行機比で 44% の高速化が実現できることが数値計算で示されている¹¹⁾。

(3) 省エネルギー化

配線の電気抵抗は発熱の原因になる。また、配線の量や長さに依存して配線の浮遊容量が増加し、配線への充放電電流が増えることも発熱の原因になる。TSV 技術で電気配線長を短くできると、これらのエネルギー損失を減らすことができる。また、損失による信号減衰や遅延が原因で必要となっていた配線途中へのリピータ(信号中継素子)の挿入数も削減でき、その電力を減らすことができる。(2)で挙げたスーパーコンピュータ用 LSI への適用例では、14% の省エネルギー化を実現できると試算されている¹¹⁾。

(4) 多端子化

TSV 技術によって、多端子化も実現できる。従来、SiP 技術におけるワイヤボンディングは、チップの周囲に配置されるため、チップの周辺からだけしか端子が引き出せなかったが、TSV 技術を用いた場合は、LSI チップの任意の位置に端子を設けられる(図表 1)。端子に接続できるインタフェースの数が増え、端子位置の制限が減ることで、LSI チップ間接続の設計自由度が高まるとともに、回路レイアウトの自由度も高められる。さらに、端子から出る配線数を増やせることで、LSI チップ間のデータの並列伝送数を増やすことができ、データ転送の高速化にも寄与する。

(5) 多機能化による高機能化

従来から SiP 技術を使った多機能化が図られてきたが、TSV 技術を使って多端子化のメリットを生かせば、より多くの LSI チップ機能を 1 つの外装ケースに収容できる。具体例として、多数のメモリチップと多数の高速プロセッサ

チップ、それに多数のイメージセンサを TSV 技術で多端子接続して実装し並列処理できるようにし、高速化および小型化のメリットも活用すれば、毎秒 1 万フレームの高解像度・高速イメージセンサが、1 つの外装ケースに収容できる¹²⁾。このように、従来にはない高機能化を実現できる。

2-4

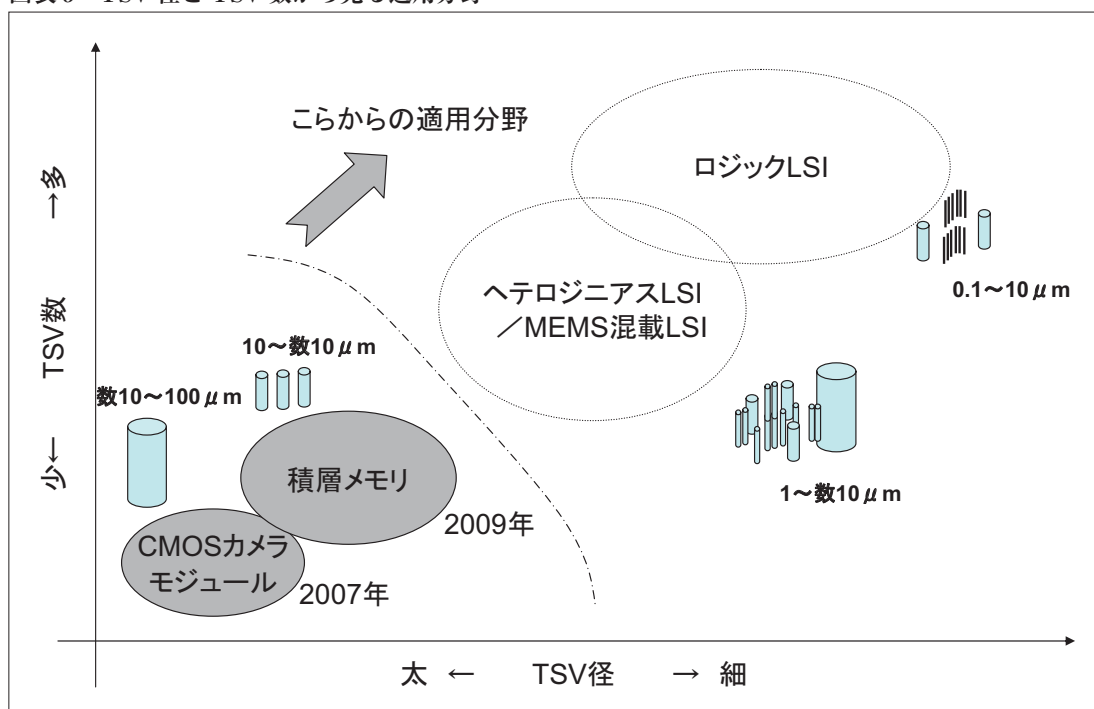
TSV 技術の適用分野

配線の微細化が進んだ LSI には、それに見合うように、より細い径の TSV が要求され、回路規模が大きくなる LSI には、より多くの TSV 本数が要求されるようになる。

図表 5 は、横軸に TSV 径の太さを、そして縦軸に TSV 数を示し、この 2 軸上の該当箇所に適用分野、あるいは製品を位置づけたものである。

例えば、すでに発表されたカメラモジュールの TSV 技術は、TSV

図表 5 TSV 径と TSV 数から見る適用分野



科学技術動向研究センターにて作成

数も少なく、TSV 径も太い。同じく発表済みのメモリ積層では TSV 数も増え、TSV 径も細くなっているが、TSV 数はまだ数千本単位に留まっていた。しかし、これから開発されると考えられるロジック LSI 部品などでは、さらに小径の TSV を数万本単位に増やしていくことが必要になってくる。スペースという意味では、仮に TSV 径を $1\mu\text{m}$ とすれば、 1mm 四方のなかに、TSV を 100 万本まで形成でき

る。ただし、LSI 部品内で使われる TSV 径は、1 種類ではないこともある。ロジック LSI などでは、小径の TSV が適用される信号系と、電流容量を確保するために太い TSV が必要な電源系とが混在する。また、異種の LSI チップを混載するヘテロジニアス LSI や MEMS 混載の LSI 部品でも、さらに様々な径の TSV が適用されるであろう。

したがって、ひとくくりに TSV

技術といっても、その適用分野によって、TSV の形成技術の難度は大きく変わってくる。

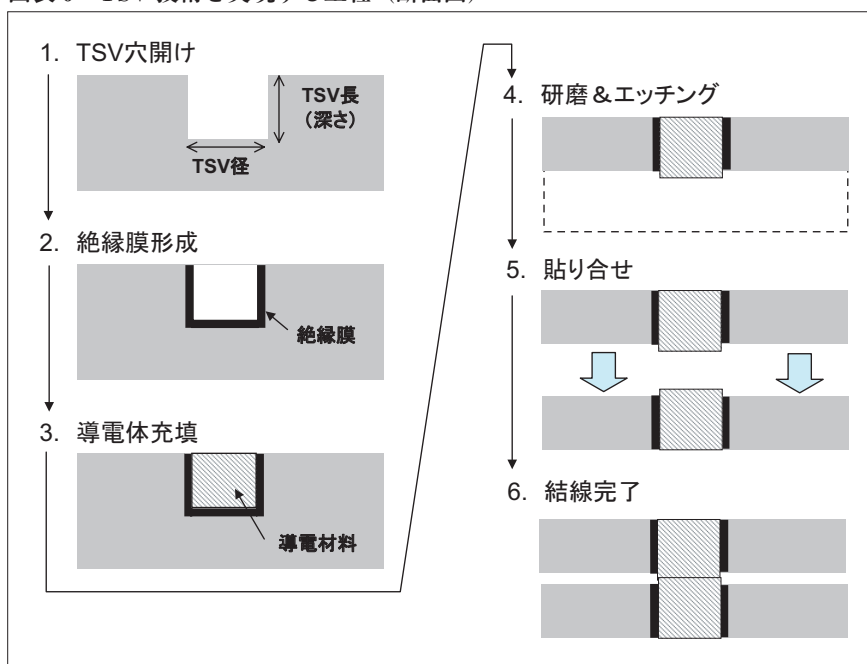
2-5

TSV 技術を実現する工程

TSV 技術を実現する工程は、シリコン基板 (LSI チップが作られる基板) に TSV を形成する工程と、これらの LSI チップを貼り合わせ、TSV を介して LSI チップ内の電気配線を接続する工程から成る。

まずは、シリコン基板に穴を開け (図表 6 の 1.)、シリコン基板と TSV との干渉を避ける絶縁膜を形成し (同図の 2.)、導電体を充填して (同図の 3.)、TSV が完成する。次に TSV 相互の接続を行うため、TSV が設けられたシリコン基板を研磨で薄く加工し、TSV を残すようにエッチング処理 (不要部分を除去) することで、TSV を露出させる (同図の 4.)。最後に、LSI チップを貼り合わせ (同図の 5.) て TSV 相互をつなぎ合わせることで、TSV を介した 2 つの LSI チップ間の配線接続が完了する (同図の 6.)。

図表 6 TSV 技術を実現する工程 (断面図)



科学技術動向研究センターにて作成

3 TSV 技術に関わる研究開発課題

3-1

製造に関わる主な技術課題

(1) TSV の穴開け技術

製造に関わる技術課題の中で、まず挙げられる大きな課題は、TSV を貫通させるための穴を、シリコン基板に開ける技術にある。

TSV の穴開け技術は、アスペクト比 (TSV の長さ / TSV 径) が数倍から数十倍になるような、小径で

深い穴を開けるといいう難しい技術である。穴径が小さく、また、アスペクト比が高いほど難度は増し、アスペクト比が高いほど加工時間 (穴開け処理時間) も長くなる。どのようなプロセスをどう使うのか、TSV 径、TSV 長をどう決定するかなどの試行錯誤が繰り返される。

TSV 穴開け手法としては、MEMS の加工技術として開発された深掘りプロセスである「Bosch プロセス」¹³⁾ と呼ばれる方法と、Bosch プロセスではないという意味で

「non-Bosch プロセス」と呼ばれる方法がある。Bosch プロセスとは、ドイツ Bosch 社が開発した穴開け方法であり、反応性イオンエッチングで浅い穴を掘り、次に絶縁壁を作り、また穴を掘り進める処理を繰り返すことで垂直に深い穴を開けていく方法である。反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching: RIE) とは、反応性のある気体 (エッチングガス) を充満させた環境で電磁波を照射することでプラズマを発生させ、試料に電位を与

えることでイオンやラジカルをぶつけて穴を開ける技術である¹⁴⁾。

一方、non-Bosch プロセスは、プラズマエッチングの制御方法を工夫することで、エッチング方向に異方性を持たせ、結果として、Bosch プロセスに必要な絶縁膜形成の処理を穴開けの途中で行わずに深掘りを可能にした方法である。

このようにして開けた穴の内壁に絶縁膜を形成し、次いで導電体を充填することになるが、導電体として使われる材料は TSV を形成する工程により影響を受けるため、後述の(4)でまとめて説明することとし、次に、研磨とエッチングについて説明する。

(2) 研磨とエッチング技術

TSV 用の穴を開けるには長時間を要することから、TSV 長が短くてもよいようにするため、研磨によってシリコン基板を数百 μm から数十 μm 程度に薄くする。さらに、電極となる導電体を露出させるために、シリコン基板のエッチング処理を行う。積層時の厚さ方向の実装密度を高め、完成した LSI 部品を薄く仕上げるためにも、シリコン基板を薄くすることは有効である。ただし、研磨する際には機械的なストレスがシリコン基板にかかる為、シリコン基板にガラス基板を貼り合わせて堅固にした上で一連の処理を行うなどの配慮が必要になる。また、この処理が終了すると、このガラス基板を取り外すなどの処理を必要とする。この研磨の手順をどうするか、研磨によって発生する粉じんの処理をどうするかといった課題のほかにも、この貼り付けの接着剤をどうするか、どのようにガラス基板を剥離するかなどの研究が行われている。

(3) 接続技術

TSV 相互の接続技術には、LSI チップを切り出す前のシリコン基

板(ウェハ)単位で貼り合わせる方法(Wafer to Wafer)、ウェハから切り出した LSI チップ(ダイ)をウェハに貼り合わせる方法(Die to Wafer)、切り出した LSI チップ同士を貼り合わせる方法(Die to Die)がある。この貼り合わせ方法も、技術の難易度やコストの両面で一長一短があり、そのプロセスが研究の対象になっている。この貼り合わせの際に、ウェハ単位で貼り合わせる場合には、例えば直径 300mm の円盤状のウェハで、その上にある LSI チップ毎に数千から数万点に及ぶ直径 $1\mu\text{m}$ の TSV がすべて正確に重なるような位置合わせを行うため、高度な位置合わせ技術が必要になる。接続技術には、LSI の回路を向き合わせて貼り合わせる方法(Face to Face)と、LSI を同方向に縦積みにして貼り合わせ方法(Face to Back)があり、この LSI チップの向きの違いによっても異なる貼り合わせ技術の研究が必要になる。

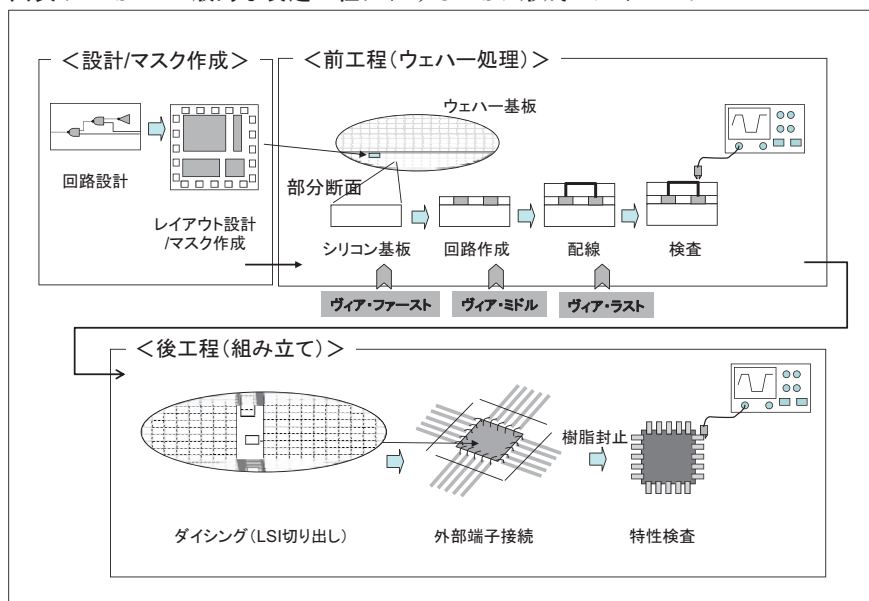
(4) TSV 形成のタイミング

製造工程のどの段階で TSV を形成するかというタイミングにより、3つのプロセスがある。図表 7 に

は一般的な LSI の製造工程を示した¹⁵⁾、この工程に当てはめて、この3つのプロセスを説明する。1つめはヴィア・ファースト(vias first)と呼ばれ、回路作成前のシリコン基板の状態ですべて TSV を形成する方法である。2つめのヴィア・ミドル(vias middle)は、回路作成が終わり回路間の配線がなされる前に TSV を形成する。分類によってはこのヴィア・ミドルまでをヴィア・ファーストに含めている場合もある。3つめのヴィア・ラスト(vias last)は、配線が終わったあとに TSV を形成する。LSI チップを重ねたあとでチップ間を貫通する TSV を形成する場合もヴィア・ラストと呼び、図表 7 の後工程に位置する。

これらのタイミングの違いにより、TSV に充填する材料も異なる。電気配線である TSV には導電体を用いるが、ヴィア・ファーストやヴィア・ミドルでは、高熱に耐え、工程への親和性が高いポリシリコンが、ヴィア・ラストでは使用する材料制限が緩くなり、Cu (銅)、W (タングステン)、Al (アルミニウム)が使われる¹⁶⁾。充填材料に求められる電気特性としては低抵抗(高電気伝導率)が求められるが、

図表 7 LSI の一般的な製造工程における TSV 形成のタイミング



参考文献¹⁵⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

ポリシリコンは抵抗値が高く、Cu、Al は抵抗値が低い。その為、ポリシリコンを嫌い、Ni（ニッケル）を使う検討もされている。

TSV 製造の最良タイミングもまだ定まっておらず、研究対象となっている。

3-2

複雑化かつ高度化する 周辺技術課題

以下は、従来の LSI 製造技術においても課題であったが、TSV 技術を適用するにあたり、さらに複雑化、かつ高度化する技術課題である。

(1) テスト技術

TSV 技術を使って多数の LSI チップや MEMS を多段実装すると、内層に位置する LSI チップや MEMS の動作テスト用端子（インタフェース端子）は、完成した LSI 部品の外部に露出しない場合が出てくる。この場合には、内層の LSI チップや MEMS の動作テストは、すべて、外部に露出した端子からしか行えないため、インタフェースは制限され、その結果、テスト項目は複雑化し、テストには長時間を要してしまう。よって、効率よく動作テストを実施するための方策として、例えばテスト項目を絞り込むテストプログラムの開発や、高速のデータ取得、解析手法の研究が必要になってくる。

また、この外部端子における動作テストで不合格になるということは、多数の LSI チップや MEMS が不良品になり、損失を大きくすることを意味する。よって、従来に増して、LSI チップ単位で良品の判別テストが重要になる。

(2) 熱設計技術および放熱処理技術

一般に、LSI が動作すると発熱し、LSI チップ自体の動作環境温度を上げてしまう。高温環境下での動作は LSI チップの信頼性を低下させるため、信頼性確保のためには熱設計と放熱処理が重要になる。特に縦積み実装の場合には、積層の内部に挟まれるチップの熱設計が難しくなる。また、LSI チップの発熱に分布差が生じると、熱膨張の違いによる機械的なひずみが生じて TSV 接続箇所にも過度の負荷がかかるなど、これも LSI 部品の信頼性を低下させる要因になるため、熱設計による対処が要求される。一方で、図表 8 に示すように、ダミーの TSV を形成し、TSV の熱伝導を積極的に利用して熱の拡散や放熱に使おうという考えもある¹⁷⁾。

また、発熱の大きい LSI チップを多段積層する場合には、さらに踏み込んだ熱設計が必要になる。例えば、前述した技術研究組合の ASET では、ハイエンドの LSI 部品の水冷技術について、LSI チップ間に冷却水を流す実験が行われてきた⁵⁾。また、IBM 社でも、冷却液を使ったオリジナルな冷却技

術を研究する動きがある。

熱設計のためには、レイアウト設計段階での熱シミュレーションや、熱による機械的な歪みを考慮した構造解析も必要になるが、これらを統合化して、電気設計と熱、構造などの協調設計の研究も必要になってくる¹²⁾。

(3) 信号品質および電源品質の解析技術

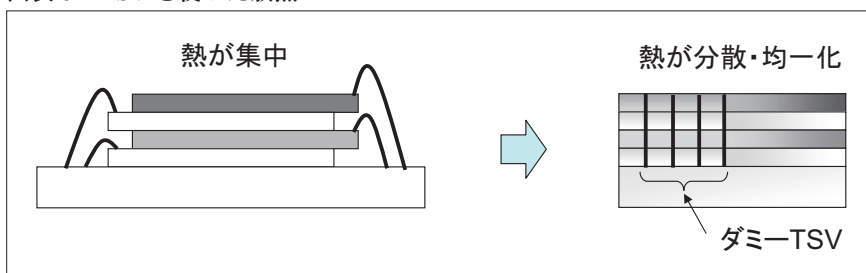
TSV 技術を組み込んだ LSI 部品では、従来に無かった縦配線となる電極が新たに加わる。従って、この TSV の導電素材・周囲の絶縁材・貫通するシリコン基板の物理特性を考慮して TSV の信号伝送に関連する電気・電磁特性を設計しなければならない。また、回路シミュレータを使った信号品質(SI: Signal Integrity という)の解析を行うための TSV の部品モデル、すなわち擬似電気回路網の作成も研究対象である。このモデル作成には、回路シミュレータと電磁界シミュレータの連携が欠かせない。

また、従来のノウハウを生かしながら what if 解析、すなわち仮説、仮定に基づくパラメータ変更解析を行うことも必要になり、シミュレータの高速化が求められる。

一方、LSI の安定動作のために、直流的には電圧降下が少なく、交流的には電圧変動が少ないことが求められる。これを、電源品質(PI: Power Integrity という)が良いという。

直流的な電圧降下に関しては、TSV 径の太さや TSV の充填に用いる導電体の直流抵抗値などがパラメータになる。また、交流的な変動は、キャパシタンス(静電容量)とインダクタンス(誘導係数)がパラメータとなる。特に高周波の変動を低減する部品としてキャパシタ(コンデンサ)が使われるが、キャパシタの効果を十分に生かすためには LSI チップの直近に配置することが有効であるため、LSI チッ

図表 8 TSV を使った放熱



科学技術動向研究センターにて作成

プの中にキャパシタを設けたり、インタポーザの中にキャパシタを埋め込んだりする技術が求められる。

(4) 電磁干渉回避 (EMC:Electromagnetic Compatibility) 技術

直接に配線されていない回路間であっても、電磁結合による相互の干渉により、互いの回路動作に影響を及ぼす場合がある。TSV 技術では、LSI チップや MEMS の混載により、様々な電圧・周波数の信号が交錯し、かつ、LSI チップ間は数十 μm 、TSV 間は数 μm にまで配線が近接することから、配線間の電磁干渉が無視できなくなってくる。また、電磁干渉を低減させるひとつの有効な手段は、回路の近くに、面積が広く、電位の安定した基準電位(グラウンド)を設けることであるが、TSV 技術では多段積層になることで、全ての回路に共通する基準電位の配置が難しくなる。

さらに、電磁ノイズ放出の低減に関する研究も重要となる。上記の電磁干渉が外部の機器の動作や通信に影響を与えることがあるため、電磁ノイズ放出の上限値が国際規格で決められ、我が国でも放出規制を行っている¹⁸⁾。TSV 技術により LSI 部品が高密度化し、高機能化・大規模化すると、これらの電磁ノイズ放出抑制に対する対処法も複雑化してくる。

ここでも、SI や PI の設計に使われるシミュレーション技術が重用される。

3-3

TSV 技術の設計に関わる技術

LSI の製造工程は、設計工程・前工程・後工程に分けられるが(図

表 7)、その冒頭にあるのが設計工程である。設計工程は、システム設計・論理設計・レイアウト設計・テスト設計などの各設計項目に分けられる。また、近年では設計と製造は緊密に連携していることから、製造方法の決定も、設計技術の一部とみなす。この設計工程全体を通して、電氣的、機械的な条件・制約の中で、製造の最適化を図りながら製品化するための技術が、設計技術である。設計技術は、設計思想(アーキテクチャー)に基づき、EDA (Electronic Design Automation、設計自動化)ツールなどの設計支援ソフトウェアツールを使うことで実現される。このうち、TSV 技術を導入するにあたって、設計工程で主に考えなければならないのは、以下の 2 点である。

(1) TSV 技術特有の設計技術

2-3 項で述べたように、TSV 技術を使った 3 次元実装技術は、設計の自由度を大きく高める。言い換えれば、設計の良し悪しにより完成する LSI 部品の性能が大きく変動する可能性を有していることになる。具体的には、TSV 技術の適用によって、LSI チップや LSI 部品のレイアウト設計に大きな影響を与えるということになる。レイアウト設計とは、回路部品の配置とその間の配線を行い、LSI チップの製造で使用するマスクデータを作成する作業である。特に、大規模ロジック LSI 部品の設計を行う場合には、全体最適となる各配線長を考慮して、TSV の位置を決定する必要がある。この際、性能のよい LSI 部品を効率よく設計するには、新たな EDA ツール開発を伴う新しい設計技術の開発が必要になる。

また、SiP 技術では入出力(I/O)回路を備えたパッドを介して外部への配線を行っているが、TSV 技

術では、I/O 回路を介さない LSI チップ内の回路間接続も可能になる。それ故、回路間の接続にあたっては、I/O 回路が担っていた波形整形も考慮した対策も必要となる。さらに言えば、よい設計を効率よく行うためには専用の設計ツールが必要になるということである。

(2) 各企業が競争優位を保つ ための設計技術

TSV 技術のコアとなる技術は、TSV 形成のための製造装置を用いることを基本とするが、各種のコア技術の最適な組み合わせはまだ決まっていない。製品化にあたっては、それぞれの半導体メーカーがこれらの技術を選択して独自の組み合わせを行い、製造装置のパラメータ設定などのノウハウを生かすことで、他社に対して競争優位を保つ開発を行うことになる。この開発においては、製造性、製品性、信頼性、コストなどを総合的に判断して LSI 部品全体の設計を決める必要がある。その重要な技術要素は前項にも列挙したが、忘れてはいけないのが「コスト」である。SiP 技術の例では、小型化、高密度化、多機能化については、すでにワイヤボンディングでの製品化の実績がある。TSV 技術の設計技術はワイヤボンディングを使った製品とのコスト比較が重要な設計要素となる。デバイス技術者が許容範囲とする TSV 採用によるコスト上昇の水準は、300mm ウェハー 1 枚あたりで 200 米ドルとされている。しかし将来的にはこれを 50 米ドルに下げるとの目標が示されている¹⁹⁾。これを達成する見込みのある日本のベンチャー発の製造技術も発表されている²⁰⁾。このような技術の取り込み、自社向けへのアレンジなどの積み上げが、競争優位を保つ戦略につながると考えられる。

4 TSV 技術に関連する研究体制の具体例

3章で述べた各種研究課題の解決に向けて、現在、世界中で様々な研究開発が行われている。図表9は、TSV 技術に関わる研究を行っている、半導体の設計や製造、およびナノ加工などの代表的な研究機関である。本章では、これらの拠点で行われている TSV 技術の実用化を見据えた実行プロジェクトを抜粋し、それぞれの特徴を示す。

4-1

米国 SEMATECH (Semiconductor Manufacturing Technology Institute)

米国 SEMATECH では、TSV 技術開発のプログラム「3D Interconnect」を2007年3月に立ち上げており、協業の参加者を呼び掛けている。その協業のターゲットは「area of basic, precompetitive R&D」、つまり、産業上の非競争分野であるとされている。このプロジェクトには以下の特徴があ

る^{21、22}。

(1)参加メンバーの多様性

参加メンバーの対象は世界中に広がっており、半導体販売社、チップメーカー、材料メーカー、組み立て&パッケージング会社に加え、設計、テスト、半導体製造装置など、全半導体産業分野にわたる。

(2)現場志向のアプローチ

TSV 技術の課題解決手段として、①3D 実装の方法、製造方法、使用ツールなどの業界コンセンサスを得ること、②製造フローのコストや製品に依存した知識を増やすこと、③特定の完成した製造方法を開発すること、④ロードマップ作成と標準化作業を行うことが挙げられており、現場志向のプログラムが組まれている。

(3)その他の特徴

本プログラムの参加促進策としては、SEMATECH が有する新しい製造技術が使えることが挙げられる。このプログラムとは別に、SEMATECH は、LSI 製造装置メーカーである東京エレクトロン(株)と密接な協力関係にあり^{23、24}、TSV

形成のためのエッチング装置の開発においても連携している。半導体製造装置メーカーとの連携強化は、特に「前工程」(図表7)と呼ばれる半導体製造工程の技術力強化につながっている。SEMATECH は前工程分野で、CNSE (College of Nanoscale Science and Engineering) のような大学との共同研究も行っている。

4-2

ベルギー IMEC (Interuniversity Microelectronics Center)

ベルギーに本拠を置く IMEC では、2004年からTSV技術への基礎技術の取り組みを開始し、2006年からIIAP(IMEC Industrial Affiliation Program)という3次元集積の個別プログラムを用意して、産業化活動を活発化させている。そのゴールは、3次元実装領域のテクノロジーと設計問題の探求である。このプロジェクトには以下の特徴がある^{25、26}。

(1)参加メンバーの多様性

協業のパートナーは世界中から集まる、IDM (integrated device manufacturer; 設計から製造、販売まで行う半導体メーカー)、パッケージング会社、製造(全部/一部)委託の半導体メーカー、EDA ツール開発会社、半導体製装置メーカー、材料メーカーである。

(2)革新的な解決法へのアプローチ

研究範囲は、パッケージレベルからLSIチップ内にまで入り込んだ、異なる配線階層での3次元配線となっており、コストを意識した実用化へ向けての技術探求と

図表9 代表的な公的研究拠点

組織名称	所在地
SEMATECH (Semiconductor Manufacturing Technology Institute)	米国
ジョージア工科大学	米国
マサチューセッツ工科大学	米国
レンセラー工科大学	米国
RTIインターナショナル	世界各地 (米国発)
アーカンソー大学	米国
MITリンカーンラボラトリ	米国
IMEC (Interuniversity Microelectronics Center)	ベルギー
CEA-Leti (フランス原子力電子情報技術研究所)	フランス
フラウンホーファー 信頼性・マイクロインテグレーション研究所	ドイツ
IME (Institute of Microelectronics)	シンガポール
ITRI (Industrial Technology Research Institute)	台湾
ASET (超先端電子技術開発機構)	日本
東北大学	日本

参考文献⁵⁾を基に科学技術動向研究センターにて加筆して作成

もに、革新的な解決法の提案を求めている。特に、システムレベルで3次元配線を利用可能にする重要な設計問題における設計領域の探求と設計法の提案を目標としている。TSV技術のロードマップも示されており、将来的には、TSV径を0.1 μm にまで微細化した、LSIのトランジスタレベルの精度での回路間接続を目指している。これは、2-2項で述べた「SoCの発想転換」の具体的な動きである。

(3) その他の特徴

IMECにはEDAツール開発会社が協力している点で、SEMATECHの取り組みとは異なる。また、IMECは大学である立場から、このプログラムとは別に独自の先端研究を行っており、半導体製造技術の研究ではSEMATECH同様、世界トップレベルの知見の蓄積がある。IMECで開発された世界最先端の半導体製造装置を利用できることが、このプログラムへの参加を促す、外部へのアピールになっている。

4-3

欧・米・韓による EMC-3D (Semiconductor 3-D Equipment and Materials Consortium)

EMC-3Dという、欧・米・韓にまたがるプロジェクトは、2007年にフランスのCEA-Letiが参画を表明し、活動を開始している。EMC-3Dの活動の目的は、3次元チップ積層とMEMS集積化のための、コストを考慮したTSV技術の開発である。このプロジェクトには以下

の特徴がある²⁷⁾。

(1) グローバルな参加メンバー

EMC-3Dは国際コンソーシアムの形態をとっており、欧・米・韓にまたがる、材料メーカー、半導体製造装置メーカーのほかに、大学や企業の研究開発部門がパートナーとして参加している。

(2) 業務分担によるアプローチ

各参加メンバーはその専門分野別の研究開発テーマを持っており、TSVの形成技術、ウェハーの研磨技術、LSI積層の技術、実装技術などの研究目標を分担している。全体的には、低コストのTSV技術の実用化を目指し、完成度の高い試作を繰り返している。

(3) その他の特徴

半導体製造会社自体は参加メンバーになっておらず、メーカー組織内の研究所が参加している点に特徴がある。また、公的研究機関としては、ドイツのフラウンホーファー研究所、フランスのCEA-Letiなど、基礎技術を研究している組織が関与している。これらの取り組みは、SEMATECH同様、産業上の非競争分野を狙っていると考えられる。EMC-3Dは、日本のASETプロジェクトに対抗して組織されたプロジェクトであると言われている。このため、日本を除いた主要な組織が参加しているコンソーシアム形式のプロジェクトになっている。

4-4

日本 技術研究組合 超先端 電子技術開発機構 (ASET)

TSV技術の実用化研究で日本のASETは、世界に先駆けて、1999年にコンソーシアム形式のプロジェクトとして立ち上げ、活動を開始した。現在は、「立体構造新機能集積回路(ドリームチップ)技術開発/多機能高密度三次元集積化技術」をテーマにして、TSV技術の実用化を見据えて研究開発を行っている。

(1) 実用化を見据えた参加メンバー

参加メンバーは、電子機器メーカー、半導体メーカー、材料メーカー、半導体装置メーカー、パッケージング会社など、TSV技術の実用化を見据えた産業界に加えて、複数の大学、(独)産業技術総合研究所(AIST)から成る¹²⁾。

(2) 実用化を検証するアプローチ

資金は、(独)新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)からの委託事業から得て、研究が行われている。回路および電磁界シミュレーション、インタポーザを利用したSIおよびPI技術、テスト技術、熱設計技術、研磨技術、TSV技術を導入したLSI部品の試作など、TSV技術の実用化に近い研究開発が行われている^{12)、28)}。

(3) その他の特徴

参加メンバーである半導体装置メーカーは、TSVの穴開けなどに関わる製造装置のメーカーだけでなく、テスト技術などを得意とするメーカーが参加している点で、他のプロジェクトと異なる。また、TSV形成にかかる各工程の要素技術のほとんどは、すでに完了したものと位置付けており、現在は、製品化を意識した周辺技術(3-2項)の開発が主な研究対象になっている。

5 おわりに

TSV 技術は、従来の微細化の追求に代わり得る高集積化のための実装技術として注目されているとともに、複数の異種 LSI チップや MEMS を混載して多機能 LSI を実現できる点でも、その適用に大きな期待が寄せられている。

TSV 技術に関する各国のプロジェクトを概観すると、TSV 技術の基本技術とその応用の研究開発に余念のない米国の拠点、EDA ツールの新規開発と技術適用の将来展望を持って TSV 技術の実用化にも力を入れている欧州の拠点、基礎技術を有しながら TSV 技術適用の実用試作に注力している欧・

米・韓連合のコンソーシアム、周辺技術などを抑えて実用化に取り組む日本のコンソーシアム、という違いが窺える。中でも日本の研究体制は最も「出口」に近いところで行われているようである。

TSV 技術の導入には、小型・高密度化のほか、高速化、省エネ化、多機能・高機能化などメリットは多いが、解決すべき技術課題も多く抱えている。課題は、設計技術、TSV 形成の製造技術、そして実用化に至る周辺技術まで範囲は広く、その解決に向けた研究拠点の活動は世界中に広がっている。これらは総じてグローバルな連携を志向

した動きであり、最先端の LSI 開発技術の進め方として、グローバルな連携というキーワードは注目していく必要があるだろう。

謝辞

このレポートを作成するにあたり、東北大学 小柳光正教授、東北大学 小林広明教授、研究組合超先端電子技術開発機構(ASET) 嘉田守宏部長、IMEC (Inter-university Microelectronics Center) 日本代表部 石谷明彦博士に多くの情報と助言を頂きました。深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 黒田研究室ホームページ：
http://www.kuroda.elec.keio.ac.jp/publication/paper_and_lecture/2009.html
- 2) 岩田 穆 ほか 「(招待講演)無線/光配線による三次元集積の課題と展望」 信学技報 vol. 108, nNo.140 ICD2008-53, pp89-94, 2008 年 7 月
- 3) 広瀬全孝 ほか 「三次元光結合共有メモリ集積装置」 特開昭 61-003450 1986 年 1 月 9 日 (公開)
- 4) 山田隆章 「積層チップ」 特開 2010-016238 2010 年 1 月 21 日 (公開)
- 5) 盆小原学 ほか 「SiP 技術と三次元実装技術の動向と将来」 招待論文 電子情報通信学会論文誌 C Vol.J87-C No.11 pp.791-801 2004 年 11 月
- 6) J.U.Knickerbocker et al. 「Development of next-generation system-on-package (SOP) technology based on silicon carriers with fine-pitch chip interconnection」 IBM J. RES. & DEV. Vol.49 No.4-5 July/September 2005
- 7) P.Ramm 「EUROPEAN ACTIVITIES IN 3D SYSTEM INTEGRATION -THE e-CUBES PROJECT」 12th Annual Pan Pacific Microelectronics Symposium Maui, Hawaii, February 1,2007
- 8) (株)東芝プレス発表 (2007 年 10 月 1 日) : http://www.toshiba.co.jp/about/press/2007_10/pr_j0102.htm
- 9) エルピーダメモリ(株) プレス発表 (2009 年 8 月 27 日) : <http://www.elpida.com/ja/news/2009/08-27.html>
- 10) 傳田精一 「3次元チップ積層のためのシリコン貫通電極 (TSV)の開発動向」 表面技術 Vol.58, No.12 2007 年
- 11) 小林 「Greeting and opening Remarks by Cyberscience Center」 11th Teraflop Workshop Oct. 19-20, 2009)
- 12) 嘉田守宏 「3次元集積技術の開発動向と低コスト化に向けた展望」 TSV テクノロジー・コンファレンス 2009・セミナー 日経マイクロデバイス社主催 2009 年 4 月 16 日
- 13) <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B7%B1%E5%A0%80%E3%82%8A%E3%83%B3%E3%82%B0>
- 14) <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8D%E5%BF%9C%E6%80%A7%E3%82%A4%E3%82%AA%E3%83%B3%E3%82%B0>
- 15) <http://www.necel.com/fab/ja/line/line1.html>
- 16) 加藤理 「貫通電極を用いたチップ積層技術の開発」 OKI テクニカルレビュー 第 211 号 Vol.74No.3 2007 年 10 月
- 17) S. Arkalgud 「Challenges in 3D TSV Technology」 SEMICON West 2009 2009 年 7 月 15 日

- 18) 一般財団法人 VCCI 協会ホームページ : <http://www.vcci.jp/general/objective.html>
- 19) NIKKEI MICRODEVICES 2009 4 月号 No.286 pp18-pp21 2009 年 4 月 1 日
- 20) NIKKEI MICRODEVICES 2009 12 月号 No.294 pp95-pp98 2009 年 12 月 1 日
- 21) SEMATECH ホームページ : <http://www.sematech.org/research/3D/index.htm>
- 22) SEMATECH ニュースリリース : <http://www.sematech.org/corporate/news/releases/20070321.htm>
- 23) (株)東京エレクトロン プレス発表 : http://www.tel.co.jp/news/2009/1203_001.htm
- 24) SEMATECH プレス発表 : <http://www.sematech.org/corporate/news/releases/20081029.htm>
- 25) IMEC ホームページ (IIAP) : http://www2.imec.be/content/user/File/Leaflets/cmos-iiap-3D-2009_EN.pdf
- 26) IMEC ホームページ : <http://www.imec.be/ScientificReport/SR2008/HTML/1224952.html>
- 27) EMC-3D ホームページ : <http://www.emc3d.org/index.html>
- 28) ASET ホームページ : <http://www.aset.or.jp/kenkyu/project.html>

執筆者プロフィール



吉永 孝司

情報通信ユニット
科学技術動向研究センター 特別研究員
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

ICT 企業で EMC (電磁環境両立性) 規格を担当し、同・国際標準規格の制定に寄与。その後同社で電磁ノイズに対する電子機器の耐性向上の研究に従事し、2008 年より現職。専門は電磁波測定と耐電磁ノイズ設計技術。



野村 稔

科学技術動向研究センター 客員研究官
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

企業にてコンピュータ設計用 CAD の研究開発、ハイ・パフォーマンス・コンピューティング領域、ユビキタス領域のビジネス開発に従事後、現職。スーパーコンピュータ、LSI 設計技術等、情報通信分野での科学技術動向に興味を持つ。