半導体パッケージプロセスにおける最新露光技術

李 徳*

Latest Exposure Technology in Semiconductor Package Process

Duk LEE*

* 株式会社オーク製作所装置カンパニー日の出工場光学技術部（〒190-0182 東京都西多摩郡日の出町平井 28-5）

* ORC MANUFACTURING.CO.,LTD. (28-5 Hirai, Hinode-machi, Nishitama-gun, Tokyo 190-0182)

1. 半導体パッケージ市場の動向

1.1 市場の技術背景

半導体 LSI, IC の微細化は、その露光技術の限界点を迎えてつつある中において緩やかな鈍化傾向を強めている。かつて提唱されたムーアの法則においての微細化の進化速度からの遅れは年々顕著となっており、結果的にそれらを補填する形でパッケージ全体での性能向上策が図られていると言える。この中で、さまざまな新しい手法におけるパッケージング技術が提唱・台頭・採用されてきており、昨今の混沌とした各種技術の乱立に至る一因となっている。

1.2 市場を牽引する要因

かつてパッケージ技術といえば MPU をはじめとして演算処理ユニット周辺技術がその代表例であったと言えるが、現在においては最終カスタマ製品の大きな変化の中で、その様相は一変している。代表的なものとして、PC 時代からモバイル時代への移行であろう。高周波数、高性能処理能力を達成するために微細化、さらには大電力消費も厭わなかった時代から、モバイル性能・バッテリー維持能力・高速データ通信などのかつてとは異なる最終製品の評価視点において、その製品の優劣が判断される時代になった。まさに演算ユニットにおける時代の主役は、MPU から AP[†]に移行したと言っても過言ではなからう。

AP に代表される省電力な演算ユニット、ならびにサーバー用途の MPU、産業用や高性能な画像処理ユニットである GPU の高性能化が進む中、技術的障壁として大きな課題となっているのはメモリアクセスの能力と言える。いかに高速に処理を出来る演算ユニットを有していても、メモリから送り込むデータ速度が律速となる状況を迎えつつあるからだ。それを解決すべく、半導体パッケージには高速なメモリアクセス能力が要求されてきており、従来とは異なる構造の複数手段提唱・採用が有望視されている。

また、モバイル端末内部だけではなく、端末と基地局を結ぶ通信規格の高速化を欠くことは出来ない。それに対応する技術が、5G と呼ばれる高周波通信規格である。本通信

図表 1. 5G 世代におけるネットワークモデル¹⁾

規格は高周波対応にて高速通信が可能な反面、電波到達が短距離化するために基地局が小規模な形で多数配置を要するスモールセル化が進む公算が高いと言える。つまりは絶対必要需要が増加することを意味している（図表 1）。

2. 主な半導体パッケージ市場の露光技術

2.1 FC-CSP 用途

当該市場においては、BGA などの IC キャリアパッケージに比較すると、早期にダイレクト露光装置が露光方式の主流となった。ダイレクト露光装置は 2008 年を境に一気に市場に普及しはじめた新世代の露光装置である。最大のメリットは、従来のコンタクト露光装置やステッパ装置に必要不可欠なマスクが不要であることは言うまでもない。また、マスクの代わりとなる仮想原版のデジタル描画データは、ワークの変形や伸縮の度合いに応じていかようにでも変形補正をリアルタイムで出来る強みがある。絶縁層工程においては、このメリットを最大限に生かすことで飛躍的に Pad-SRO[†] の位置合わせ精度を劇的に高めた。その反面、回路形成工程においてはダイレクト露光装置を採用した後も、パネル全面に対して 4 点一括アライメントにて量産を行っていたことも考慮すると、位置合わせ精度だけではなく、非接触露光によるパーティクル起因の歩留まり向上、ならびにマスクレスの工程的なコストメリット、さらには試作や問題発生時・デザイン変更時における対応速度

の速さが重視されたとも言える。

2.2 FC-BGA 用途

当該市場においては、コンタクト露光装置が長らく主力露光方式として君臨したが、日本国内のパッケージ最大手の2社がステッパ装置を採用・導入したことからMPUを代表とするハイエンド製品においてはステッパ装置が主流の位置を占めている。FC-CSPに比較すると、比較的単一製品の製品寿命が長くマスクコストを吸収しやすい点、2008年から2010年頃の技術ロードマップの観点ではFC-CSPよりも微細なデザインルールであり、解像力に優れながら生産性も確保しやすいステッパ装置が採用された点は、極めて妥当であったと考える。本市場における装置の特殊性は、露光面における口径が $\phi 350$ mmクラスの極めて大きな面積を有する一方、解像力は8–12 $\mu\text{mL/S}$ 程度の投影レンズを有している点であろう。現在同市場におけるパネルサイズのデファクトスタンダードは500×500 mmクラスの基板であるが、FC-BGAに要求される配線精度を満足しつつ、ショット数を減らし生産性を高めるという当該セグメントに特化した露光装置の形である。本寄稿においては、その他ステッパ装置との区分けのために当該装置セグメントを「ラフレイヤ用ステッパ装置」と呼ぶこととする。

2.3 WL-PKG 用途

前記までの市場は、すべてパネル形状の有機基材がベース材料となっているが、WL-PKG市場のサブストレートはすべてSiウェハである。また、当該セグメントの中で製品がチップダイの大きさに近い製品を特化してWL-CSPと呼ばれる。サブストレートが有機基材に比べSiウェハが高いこと、また感光材もポジ型液体レジストを使用することから各工程のプロセスコストも高いため、難度が高い最終製品に多く採用されるセグメントと言えるであろう。当該市場においては、ステッパ装置が過去も現在も主力露光方式として君臨している。前記ラフレイヤ用ステッパ装置と比較すると、露光面積は1/30以下であるが、解像性・位置合わせ精度ともに1桁程度高い精度を達成出来る点が特徴であろう。また、長い歴史の中で実績のある液体レジス

トを使用する製品群も多く、i線(365 nm)だけでなくg線(436 nm)・h線(405 nm)も露光に必要となるため、投影レンズにはマルチウェーブの色収差補正を要求される。この観点から、半導体LSIなどの最先端スキャナと大きく異なる点と言えよう。

2.4 各種露光装置の特徴と比較

ダイレクト露光装置、ラフレイヤ用ステッパ装置、ステッパ装置の3方式の特徴と相互比較を以下のとおりに定義した。当社含め、露光装置メーカー各社におけるさらなる個別の特徴や特性の差もあることは事実であるが、大きな意味での比較という観点では認識に相違はないであろう。

前述の通り、各方式にはそれぞれメリット・デメリットを有しており、100%全ての面において抜きん出た装置は存在していない。それが故に、各製品セグメントにおいて採用されている露光装置が異なる、という結果になっていると言えよう。

3. 最先端 半導体パッケージの技術要求

3.1 新世代を牽引する技術トレンド

3.1.1 FO-WLP[†]

2016年から2020年までの期間においては、20年に1度の大きな転換期を技術トレンド面で迎える様相を呈している。その代表格がFO-WLPであることは誰の目にも明らかだ。従来、有機基材をサブストレートとするFC-CSPが製品の主力構造として採用されていた分野に、Siウェハをサブストレートとする新工法FO-WLPが名乗りを上げたのだ。特にハイエンドの部分に位置するAPは、すでに世界有数の大手メーカーが採用し量産中である。このFO-WLPの最も技術的な優位性は、そのパッケージ構造の薄さであろう。高精細なファインL/SをRDL層[‡]に配置し配線密度を向上し、FC-CSP構造と比較し格段に少ないレイヤ数による構造を実現したことでパッケージの総厚が60 μm 以下のレベルを達成したことは、当時大きなインパクトを業界に与えた(図表3)。

3.1.2 有機インターポーザ(2.1D, 2.5D PKG)

MPUやGPUの処理能力の技術的障壁にメモリアクセスがあることはすでに記載の通りであるが、本課題を解決する技術的なアプローチの一つが有機インターポーザである。処理プロセッサとHBMなどを2次元実装するために必要な本技術は、2020年までに大きな飛躍を遂げると見ら

図表2. 各技術トレンドの特徴比較表

項目	ダイレクト露光装置	ラフレイヤ用ステッパ装置	ステッパ装置
解像性能	2–10 $\mu\text{m L/S}$	5–10 $\mu\text{m L/S}$	1–3 $\mu\text{m L/S}$
一括露光サイズ	パネル全面描画	150×150 mm or 250×250 mm	52×33 mm or 70×70 mm
位置合わせ精度	±3–5 μm	±3–5 μm	±1 μm
変形機能	自由変形可能	スケーリング and XY独立スケーリング	変形無し or スケーリング
オートフォーカス	面内500点以上可能	面内4–6点	面内50–150点
焦点深度	±10–30 μm	±15–20 μm	±5–7.5 μm

TMV 接続 PoP 構造

下側 FO-WLP 化 PoP 構造

図表3. FO-WLP化による従来技術との構造比較²⁾

れている。本技術要求は、限りなく WL-PKG の技術と近い精度達成であり、Si ウェハにて達成していた製品精度を有機基材のパネルにて達成しなければならないことが最大のハードルだ。有機基材のパネル工程では従来想定もしなかった微細な配線形成要求、それに伴う層間接続の開口微小化、それらトータルに影響を受ける各レイヤの位置合わせ精度向上、そして何よりも Si ウェハに比較し圧倒的に伸縮、異形変形、反りを発生する有機基材特有の課題、それら全てが本技術の達成における課題だ（図表 4）。

3.1.3 FO-PLP[†]

FO-WLP が Si ウェハをベース材料とする技術ならば、FO-PLP は同技術を用いながらパネルの有機基材をベース材料とする非常に野心的な技術である。FO-WLP はその構

図表 4. 有機インターポーザの実製品サンプルモデル³⁾

造的なメリットは優れているものの、プロセスコストに大きな課題を残している。これは Chip First 工法による IC や LSI の破損リスクなどを除いても、工程全体がウェハプロセスであること、またベース材料のサイズが $\phi 300$ mm で製品取り数が少ないことが原因であろう。FO-WLP の構造的なメリットは活かしつつ、これらの課題を解決できることが FO-PLP の最大の特徴である。

しかしながら、有機インターポーザと同様にパネルの有機基材特有の問題が大きな課題となり、そのハードルは極めて高い。歩留まり低下時における Chip First 工法での IC や LSI 破損リスクは事業モデルそのものを脅かす危険性すらある。

3.1.4 各技術トレンドの比較

図表 5 は、各技術セグメントにおける実装技術全体としての構造概要図である。この中で有機インターポーザ技術は、3D IC、3D WLP など広範な領域を有機パネルにて対応を目指す技術と位置付けられよう。

前記の大きな技術トレンドを以下の通り、比較・まとめた（図表 6）。

各技術における特徴はそれぞれあるが、いずれも共通しているのは「これらの技術が、従来の製品カテゴリ、工程カテゴリを破壊」することを必要としている点だ。FO-WLP

図表 5. 実装技術全容における各技術セグメントの位置付け⁴⁾

図表 6. 各技術トレンドの特徴比較表

項 目	FO-WLP	有機インターポーザ	FO-PLP
用途	AP	MPU/GPU	RF/PMIC パワーデバイス
パッケージ サイズ	300–800 mm ²	1,500–3,000 mm ²	200–600 mm ²
IO Ball 数	200–1,500 個	500–3,000 個	100–800 個
露光工程	ステッパ装置	ステッパ装置 or/and ダイレクト露光装置	ステッパ装置 or/and ダイレクト露光装置
使用感光材料	ポジ型液体レジスト	DFR or/and ポジ型液体レジスト	DFR or/and ポジ型液体レジスト
サブストレート	$\phi 300$ mm ウェハ	フルパネル有機基材	フルパネル有機基材

という半導体後工程技術は、従来 FC-CSP が支配的であった製品カテゴリを破壊し、すでに定着・拡大している。また、逆に FO-PLP という有機基材ベースの技術は半導体後工程のカテゴリであった WL-CSP が得意している製品カテゴリを逆に侵食しつつある。それだけではない。有機インターポーザや FO-PLP は、その製造プロセスにおいては従来の枠を大きく超え、限りなく半導体後工程のプロセス技術を採用するであろう。

つまりは、製品も工程も、すべての部分において境目が希薄になりつつあるのが半導体パッケージ技術の最先端だと言えよう。

3.2 露光技術のトレンド

これら最先端の半導体パッケージ技術から露光装置が要求されるトレンドは、何よりもその解像性・位置合わせ精度を含めたファイン化要求であることは言うまでもない。

3.2.1 ラフレイヤ用ステッパ装置

この時点で、前記3方式のうちラフレイヤ用ステッパ装置については、当該セグメントにおいてメインストリームにはなり得ない状況は明確になってきた。最大の課題は解像性、位置合わせ精度におけるファイン化の限界だ。大面積を面内で均一に解像性能を得ることは技術的に極めて難易度が高いからだ。当然生産性を勘案すると大面積一括露光の魅力は捨てがたいことも事実であり、すでに同装置を生産ラインで稼働しているメーカーにとって他手段の導入は、すなわち生産性の低下に繋がるジレンマに悩まされているであろう。また、有機インターポーザや FO-PLP に関してはパネルの凹凸、反りなど平坦性の問題が非常に大きく、ラフレイヤ用ステッパ装置における最大のメリットである大面積一括露光時に面内での焦点深度確保、すなわち線幅均一性を確保できるかの課題が一層クローズアップされることになる。

3.2.2 ステッパ装置

一方、ステッパ装置はすでに FO-WLP, FO-PLP にて生産寄与することが示されており、現時点においては露光技術の主役たる位置に最も近い存在であろう。何よりも他方式に比べて圧倒的にファイン化が容易なことがその存在感の後ろ盾だ。また、現在のこれらの最先端半導体パッケージが、FO 技術の中でも前出の Chip First 工法を採用していることもその優位性を支えている。RDL 形成時において、すでに下層に IC が埋め込まれている状態であるが、この実装精度の問題、また樹脂材の硬化時におけるダイシフトと呼ばれる IC が XY θ 方向に位置ずれを起こす問題により埋め込まれた IC 群は決して整列しているとは言えない状態だ。そのため、これらに合わせて RDL レイヤを形成するにはそれぞれの IC に対しての個別の高精度な位置合わせが要求される。つまりは、IC 単位に露光を行うことになるわけであるが、FO-WLP や FO-PLP 技術で製品化を目指す IC や LSI などの半導体 Chip のダイサイズは比較的大きくはな

い。結果、露光装置に要求される一括露光エリアは最大でも 50×50 mm 程度だ。これは、ステッパ装置の最大の泣き所である一括露光面積が小さく、露光ショット数が増加するという弱点がデメリットになり得ないということを意味する。

しかしながら、ステッパ装置にも課題は残る。1つ目は有機インターポーザにおいては実装される GPU や MPU などの半導体 Chip 自身のダイサイズが大きいこと、またその周辺に HBM を 4 個ないし 8 個以上配列する必要性から、ステッパ装置の一括露光エリアでカバーできない製品群が多数を占めることだ。この場合においては、パッケージ全体を 2 回ないし 4 回の露光にてパターンをつなぎ合わせるスティッチングと呼ばれる技術にて対応することになる。この方法は有効な手段である反面、露光ショット数のさらなる増大、つなぎ合わせパターンの接続信頼性などの課題が存在する。2つ目は装置価格が他方式に比べ高い反面、生産性が最も劣る点だ。つまり装置 COO[†]が低いということに繋がる。量産装置として、この評価点が低いことは常にメーカーを悩ませる大きな課題であろう。

3.2.3 ダイレクト露光装置

他2方式が抱える課題を原理的に解決できる手段が、ダイレクト露光装置だ。まず、ラフレイヤ用ステッパで課題の解像力や位置合わせ精度において、最新のダイレクト露光装置にでは解決の目処が立ちつつある。そして基板の凹凸や反りについてもステッパ装置では達成しえない、面内 1,000 点を超える多分割での AF 補正エリアを提供可能だ。さらには、ステッパ装置における課題である大ダイサイズのパッケージに関してもダイレクト露光装置はその制限を受けない。ダイレクト露光装置は、元々パネル全面を複数のバンドと呼ばれる露光エリア群をつなぎ合わせて露光を行う方式であり、パッケージサイズをまたぐパターン繋ぎ露光においては従来から当然のように対応してきた技術であるからだ。IC 個別のダイシフトや、パネル起因の変形などにデータ変形による高精度位置合わせを行えることも本方式の極めて有効な技術機能として挙げられるだろう。

他方、本方式の課題も残る。配線パターンの微細化に伴い、CAD データからの変換後の露光データが極めて巨大になっていることから、データ処理系の速度限界が最大の課題だ。現状は露光量起因ではなく、データ処理系の時間が生産性律速になっていると言っているであろう。また、システム全体がステッパ方式に比べると極めて複雑であり、装置安定性・メンテナンスの煩雑さなど装置の根幹に関わる部分におけるシステム信頼性が低いことは明白だ。これらの大きな課題をいかに克服するかが、今後最先端半導体パッケージ分野における露光方式の主役になり得るかの分水嶺と言える。

図表 7. 工程の最適化モデルケース

4. 今後の展望

最先端半導体パッケージにおいては、10年に1度の大きな転換期を迎えている。半導体後工程技術と有機パッケージ技術がマテリアル、露光方式、感材、その他プロセス全般において境目なくその技術トレンドを検討、採用をしていると言えよう。その流れは今後加速することは間違い無く、その中でプロセスの中心たる露光技術においては単一方式が全アプリケーションに採用される可能性は極めて低い。その時点で最適な主要性能、機能面、そしてCOOの観点での判断により、採用される方式はさまざまなパターンが存在し得る。そのような複雑な工程が想定される中、各種装置の有効機能、長所を相互に活かすためのライン全体のミックス&マッチも積極的に検討されていくであろう。

図表7に計測ユニット、ダイレクト露光装置、ステッパ装置を含めた工程の最適化のモデルケースを示す。

ダイレクト露光装置の変形自由度の高さ、ダイバイダイ[†]露光時の高速描画性能を活かしながら、ステッパ装置におけるアライメント時間のデメリットをMeasure Toolによる事前のチップ位置計測にて補完し、高解像度露光を達成するモデルケースだ。

今後、露光技術の各方式がそれぞれの弱点をいかに補い、それぞれの強みをいかに伸ばすかだけでなく、露光技術のそれぞれの長所を活かし、短所を補完するための工程構築の多様さは注目に値するであろう。当社ならびに当方も、この一翼を担うべく露光技術のさらなる発展に向けて邁進する所存である。

(2018.2.8- 受理)

文 献

- 1) Wireless Wire News 2011/2/14 (Wireless Wire News 編集部)
- 2) TSMC R&D Release 2014/6 (TSMC)
- 3) Advanced Heterogeneous Solutions for System Integration 2015 (TSMC Kees Josse)
- 4) Photolithography for Adv. Packaging, MEMS and LEDs (2015 YOLE 社)

† 用語解説

AP：アプリケーションプロセッサ。主に、モバイル機器におけるメイン処理LSI。

Pad-SRO：パターン層のCuパッドと絶縁層の開口部分のアニユラリング部分。

FO-WLP：ファンアウトウェハレベルパッケージ。

RDL 層：レジストリビューションレイヤー。チップ上に形成された微細な再配線。

FO-PLP：ファンアウトパネルレベルパッケージ。

COO：コストオペオーナーシップ。装置設備に関して投資・運営経済性の評価基準をモデル化したもの。

ダイバイダイ：露光されるチップ毎に個別にアライメントを行う手法

著者紹介

李 徳 (りー とく)

半導体露光装置の光学系開発に従事した後、現在の(株)オーク製作所にてステッパ開発、ダイレクト露光装置開発に携わる。現在は光学系に関する開発業務だけでなく、装置全体でのプロダクトマネージャーとして開発・技術営業などに従事している。