半導体業界、6インチウエハ上でのLED製造自動化に向けて前進

ポーラ・ドー

市場における需要の高まりを受け、半導体業界は、Semicon Westのカンファレンスにおいて、6インチウエハ上でのLED製造を自動化するための構成要素の規格に関する合意に向けて動き出した。

高輝度（HB）LEDに対する需要が急速に高まる中、業界ではこの5年間でおよそ100もの新しいファブ（製造工場）が設立され、世界中のLEDファブは合計で169施設になった。これによって業界全体のエピタキシ生産能力は5倍に急増し、1カ月あたりおよそ200万（4インチ換算）ウエハになった（**図1**）。しかし、同業界には、歩留まりを上げ、コストを削減するための余地がまだかなりある。より大きな直径のウエハへと移行し、より厳格にプロセスを制御する自動化製造を取り入れることによって、SSL（solid state lighting：固体照明）市場の成長を促進することができる。主要企業らは、この移行に向けた準備作業を着実に進めており、共通ウエハパラメータ、製造装置用の共通インターフェース、解析ツールからのデータを伝送するための共通の通信ソフトウェアの基本に関する合意の構築に向けて連携している。

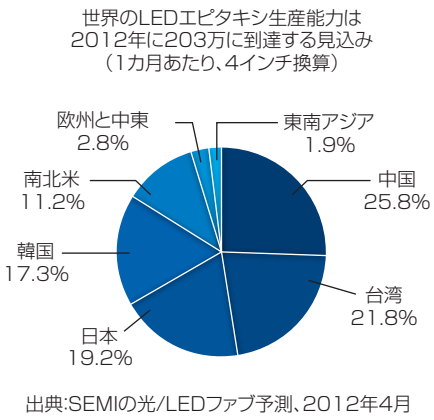

図1　2012年の地域別LED製造キャパシティ

移行に向けた原動力

6インチウエハはフロントエンドプロセスのコストが低く、歩留まりが同じであるとすると、4インチウエハと比較して、単位表面積あたり約25%のコスト削減が得られるという見積りを、仏ヨール・デベロップメント社（Yole Développement）のシニアLEDアナリストであるエリック・ヴァイリー氏（Eric Virey）は、本年のSemicon Westにおけるハイブリッド型LED製造ソリューションに関する議論の中で示した（**図2**）。この見積りでは、6インチウエハのコストが、4インチウエハの50ドルの3倍の約150ドルにまで低下することを前提としている。大きなウエハは、単位面積当たりのコストはまだ高いが、プロセスパスあたりのダイ数が多いために製造効率が高くなり、また、歩留まりが高いことから、製造コストは低くなる。

米フィリップス・ルミレッズ社（Philips Lumileds）の製造エンジニアリング担当副社長で、SEMI（Semiconductor Equipment and Materials International）の高輝度LED標準化委員会の共同委員長の1人であるイアイン・ブラック氏（Iain Black）は、「新しい世代（6インチ）の装置は、3インチのものよりも格段に優れており、歩留まりも高いという利点を確認している」と述べた。

直径の大きなウエハへの移行は、当初の予測よりもやや遅れる見込みである。LEDメーカーの現行の2インチおよび4インチの製造ラインに余剰の生産能力があることと、4インチウエハの価格が急速に低下しているために4インチウエハの競争上の優位性が高まっていることがその原因であるとヴァイリー氏は述べた。しかし6インチウエハの価格も急速に低下しており、2012年末までに200ドル未満にまで低下する可能性がある。ヨール社は、今後2～3年のうちに、サファイアウエハの総表面積の25%以上が6インチウエハで製造されるようになり、その数年後には50%に達すると予測している。

チップ製造プロセスの歩留まりを改善することは、SSLのコストを引き下げて市場の成長を促進するための達成しやすい目標であるという意見に、米カナコード・ジェニュイティ社（Canaccord Genuity）で照明および太陽光部門株式調査責任者を務めるジェド・ドースハイマー氏（Jed Dorscheimer）も同意した。同氏は、プロセスの歩留まりは、同市場の主要なメーカーの場合で通常65～70%、一部の新規参入企業の場合でわずか10%だが、半導体業界では95%を超える歩留まりが達成されていることを指摘した。各プロセス工程における小さな歩留まり損失が、積み重なると簡単に大きな歩留まりの低下につながる。同氏は、今後2年間で歩留まりの改善が順調に進めら

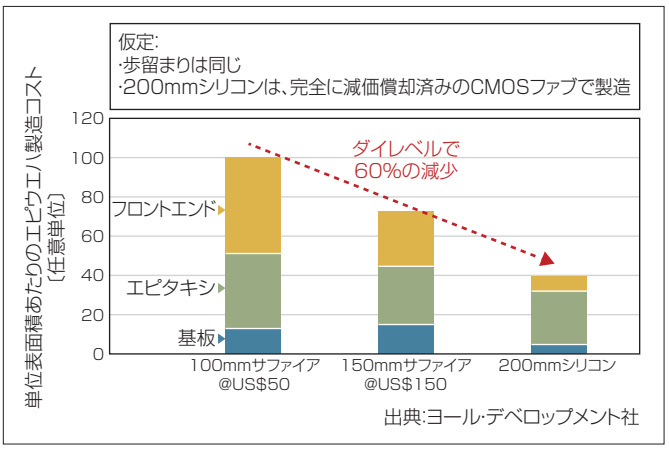

図2 6インチのサファイアウエハと8インチのシリコンウエハへの移行に伴う、潜在的なコスト上の利点

れれば、現実的な予測として60W相当のLED電球が2014年ぐらいまでに7～8ドルになり、全般照明がディスプレイを上回って、LED市場最大のセグメントへと躍進する可能性があると予測する。

この進歩を実現するための主要な要素の1つは、材料と装置の相互運用性に関する基本規格である。「サプライチェーンを成熟させるためには標準規格が必要だ」とブラック氏は述べた。「われわれは、サプライチェーンの能力を高めるために、仕様の策定にかなりの労力を注いでいる。他の企業はこの取り組みの恩恵を享受することができるが、まだ新しい業界であるため、ベンダーは自社のプロセスを成熟させる必要がある。われわれがある程度の規格を策定することができたならば、すべての企業に指針が示されることになり、それによってこれまでよりも格段に容易に能力の拡大が促進されることになるだろう。企業がそれぞれ独自に仕様を定めるとすれば、同じ状態に達するまでにかなりの時間がかかってしまう。自動化については、確立されている半導体業界の規格を主な土台として、革新を進められるのは良いことだが、共通カセットや湾曲したウエハの取り扱いについては相違点を明確にして、新たな発明が最小限で済むようにしておく必要がある」と同氏は述べた。

シリコンウエハ

6インチのサファイアウエハで、歩留まりとコストにそれだけの改善が得られるのならば、それよりも大きなシリコンウエハにはどれだけの可能性が秘められているのだろうか? 8インチのシリコンウエハは、歩留まりが同じである場合、ダイレベルで60%のコスト削減が得られる可能性があるとヴァイリー氏は報告している(図2)。ウエハのコストもかなり低いが、ここで得られる本当の利点は、BOM(bill of materials:部品表)の5～10%にしか相当しない基板コストではなく、特に完全に減価償却済みのCMOSファブを利用した場合の、効率が高く自動化された、成熟した半導体インフラストラクチャにある。まだ解決されていない主要な問題として、熱の不整合性の問題がある。これによって、ウエハに湾曲や歪みが生じ、歩留まりに影響が生じる。歩留まりはまだ、サファイアウエハよりもかなり低いが、コストが低いためにこの歩留まりの低さは許容できる可能性がある。ほとんどの主要な企業が研究プログラムを実施しているが、シリコンがサファイアの代替として広い範囲で実用可能かどうかについては、まだ判断が下されていない状態である。

ラティス・パワー・コーポレーション社(Lattice Power Corp)の最高技術責任者(CTO)を務めるハンミン・ジャオ氏(Hanmin Zhao)によると、同社は現在、2インチのシリコンウエハ上で1日あたり数百ウエハという大量生産による商用LEDダイを販売しているという。同社は、主に米国のベンチャーキャピタルから約1億2000万ドルの出資を受ける、中国を拠点とする新興企業である。同社は、AlN(窒化アルミニウム)とAlGaN(窒化アルミニウムガリウム)の応力緩和層を採用することによって、湾曲を20～30μmに低減してひび割れを防ぎ、45milのチップの製造で120lm/Wを達成している。同社は、研究施設において6インチウエハへの製造規模の移行に取り組んでおり、2013年夏の製造開始に向けて利用可能な製造施設を探している。

ウエハカセットとキャパシティ

HB-LEDの製造を自動化するには、ウエハの物理的特性に関する基本的な合意が必然的に必要となる。それらを取り扱う装置を設計するためである。来たる6インチ基板への移行を、プロセスを1から最適化する機会であるととらえて、ほとんどの主要なサプライヤやデバイスメーカーが、基本的なウエハパラメータと相互運用性の規格に関する合意に向けて協力し、Semicon Westなどの業界イベントで議論を重ねた。現在、業界全体にわたる約160人ものボランティアによる多大な尽力のおかげで、自動化に向けた6インチのサファイアウエハパラメータ、共通ウエハカセット、ソフトウェアプロトコルに関する最初のSEMI規格が、合意の形成に向けて進行している。

オートメーション作業部会は、自動化プロセスフローにおける6インチのサファイアウエハを搬送するためのカセットの外寸を、半導体製造に使用される標準の25ウエハカセットと同じにすることで合意した。既に存在するストレージラックなどのインフラに合わせるためである。Semicon Westの議論では、より厚くより湾曲したサファイアウエハを各カセットで何枚搬送するのが最も効率的かという問題が検討された。カセット内にはより幅の広いポケットが必要だが、装置メーカーは、ウエハの搬送とトラッキングを自動化するために、共通のスロットサイズと間隔を定める必要がある。

「標準のカセットフォーマットを定めることによって、装置間の相互運用性が高まり、資本コストと製造コストが引き下げられる」と米インテグリス社（Entegris）の地域製品スペシャリストの統括者で、SEMIオートメーション作業部会の共同会長を務めるジェフ・フェリープ氏（Jeff Felipe）は指摘する。キャリアが12枚のウエハを、25ウエハカセットのスロットの1つおきに対応する間隔で搬送すれば、自動化およびウエハプロセス装置において、既存の半導体ソフトウェアを使用してLEDウエハの搬送とトラッキングを行うことができる。しかし、カセットのキャパシティが小さくなるため、MOCVD（metal organic chemical vapor deposition:有機金属気相成長法）などのバッチ装置に、スループット効率を上げるためのロードステーションを追加する必要が生じる可能性がある。

あるいは、LEDカセットに16枚のウエハをセットし、キャパシティを最大限として追加のロードステーションを不要とする方法も考えられる。この場合は、残りのプロセスラインに向けてウエハを12ウエハカセットに搬送し戻すという追加の処理工程か、または、異なるフォーマットに対応するように残りの装置ソフトウェアを改訂するという作業が必要になる。業界委員会は2012年10月末まで、この問題に関する世界中のLEDメーカーからの意見を受け付けていた。

ソフトと通信インターフェース

ソフトウェアに関しては、初期の主要な問題は、LEDメーカーとその装置サプライヤが、製造品質を監視する装置から簡単にデータを取得できるようにするための、共通通信インターフェースである。独アイクストロン社（Aixtron）の企業向け制御システム担当プログラムマネージャーで、SEMIオートメーション作業部会のソフトウェア作業グループのサブグループリーダーを務めるカールハインツ・ベッヘル氏（Karl-Heinz Buechel）は、「高度な自動化では、ファブレベルで製造を制御するために、データの取得および監視方法をしっかりと確立しておく必要がある」と指摘している。

同作業部会は、SECSII/GEM（SEMI Equipment Communications Standard/Generic Equipment Model）という半導体業界のインターフェース、別のSEMI規格であるInterface A、XMLという利用可能な選択肢を調査し、SECSII/GEMに基づくシステムならば、LED製造の現在および将来の要件に対応できると結論付けた。Interface Aは、将来高度なエンジニアリングデータを取得するためにより広い帯域幅が必要になる場合に備えて検討される可能性がある。

しかしLED業界は、バッチ装置内のグラファイトプロセストレイ上のウエハを、ウエハ、位置、プロセスごとにトラッキングするという独自のニーズに対応するために、SECSII/GEMの範囲内で独自のソリューションを開発する必要がある。また、独自のSECSII/GEMアプリケーションを、既存のプロセス装置で一般的に使用されているよりシンプルな200mmウエハ版をベースに開発するか、それとも300mm版のより高度な機能が必要であるかを判断しなければならない。

同作業部会は現在、ユーザーが必要とする最も重要な機能を判断するためにLEDメーカーに対する聞き取り調査を行っている。すべての装置メーカーが、一貫した方法で装置からデータを取得し、デバイスメーカーのデータ解析システムへと供給できるようにするためである。「顧客ごとにカスタム構成の通信システムを作成していたのでは、装置のコストと、プロセス全体でデータを統合するコストが増大してしまう」とベッヘル氏は指摘する。「個々のLEDメーカーに特有となるのはデータ解析能力であり、機械からのデータの取得方法やそのフォーマット方法ではない」（ベッヘル氏）。

共通ウエハパラメータ

自動化インターフェース策定の取り組みは、6インチウエハの作業部会が6インチのサファイアウエハの基本標準パラメータに関してほぼ合意に達したことによって前進し、ウエハ製品の品質と一貫性の向上にも貢献するはずである。「さらに多くの業界標準仕様が定まれば、多くのカスタム製品を製造する場合と比較して、さらに大量の同一製品を、より厳格な制御とより低いコストの下で製造できるようになる」と、中国のチョウケイ・シリアン・オプトエレクトロニクス社（Chongqing Silian Optoelectronics）の最高執行責任

者（COO）で、SEMI高輝度LED標準化委員会の共同委員長を務めるデビッド・ライド氏（David Reid）は述べた。

ウエハ作業部会は、厚さやエッジ特性などの物理的な形状から、ウエハマーキングや基準の規約、背面の荒さ、反り量、表面の状態などの品質要件にいたるまでのウエハの特性に関する合意を形成するために、世界中の企業からの意見を募った。「使用されていた既存の仕様では、今日のわれわれの顧客にとって重要なものが適切に把握できていなかった。物事について議論し、要求と仕様を把握するための共通の方法が必要だった」とライド氏は述べた。同作業部会の規格は、1.0mmと1.3mmの両方の厚さと、ノッチとフラットの両方を対象とする予定である。そのすべてが広く使用されているためである。しかし将来的には、業界は、より薄いウエハと、基準としてはより小さなノッチへと移行する見込みである。

協力企業らは、自動化とプロセス制御システムによって生じるいくつかの新しい問題に対する解決策を見出すことを目的とした共同作業についても報告した。例えば、サファイアウエハをトラッキング用に一意的にマーキングし、識別マークがプロセス後に残るようにするための方法である。現行のウエハIDは、必ずしも一意的ではない。読み取りやすいようにウエハの前面にマーキングしたいと考えるユーザーもいれば、残りやすいように背面にマーキングしたいと考えるユーザーや、念のために前面と背面の両方にマーキングしたいと考えるユーザーもいる。

同作業部会は、各サプライヤ向けに非常に多数の独自オプションを提供する、標準のマーキングシステムを考案した。また、シリアン社、独イノラス・セミコンダクタ社（InnoLas Semiconductor）、独オスラム・オプト・セミコンダクターズ社（OSRAM Opto Semiconductors）は共同で、さまざまなディープレーザマーキングシステムのウエハプロセス後の持続性のテストを行っている。

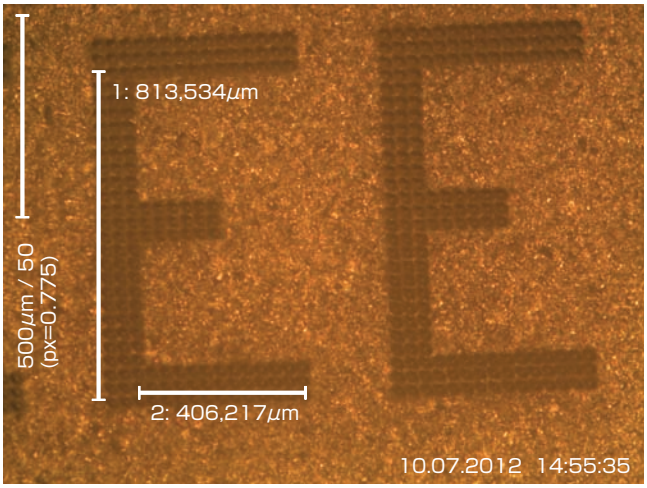

図3 持続性のテストが行われた、ドットマトリクス・レーザーマーキングの例。（提供：イノラス・セミコンダクタ社）

シリアン社からのテストウエハに対し、イノラス社がUVレーザを使用して、さまざまなドットマトリクスや英数字でマーキングする（**図3**）。そのウエハをオスラム社がプロセス処理し、マークの可読性をテストする。結果は10月までに得られる予定である。ドットマトリクス・マーキングは、ドットがプロセス後も残るほど深くはっきりと施されるならば、占有するウエハ面積が小さく、チェックが容易であるため、望ましい方法である。

同グループは現在、どのバルクおよび表面ウエハの欠陥が、製品歩留まりに最も実質的な影響を及ぼすかを見定め、それらのパラメータを測定するための共通のベストプラクティス手法に関して合意するための新しい取り組みを開始している。

台湾のエピスター社（Epistar）とTSMC社が率いるアジアにおける別のSEMIの取り組みでは、HB-LED製造における環境衛生と安全性の問題を対象とし、製造装置の設置と稼働に関するベストプラクティスを世界共通の規格として定めることを目的としている。同グループは、既存の半導体安全性規格を補完および拡張して、MOCVD装置や自然発火性ガスを伴うLED製造プロセスにより厳密に適用できるようにするための取り組みを進めている。

「われわれは世界の照明業界を変えようとしている。どの企業であっても単独でそれを行うことはできない」とライド氏は述べた。

サファイアウエハパラメータ、自動化装置インターフェース、安全性、大量生産の実現に向けたその他の項目について、合意に基づく規格の策定に取り組んでいる、業界のボランティア活動に関する問い合わせや、参加の希望については、http://semi.org/en/standards/P041367を参照するか、ポール・トリオ氏（Paul Trio、ptrio@semi.org）まで連絡してほしい。

著者紹介
ポーラ・ドー（Paula Doe）は、半導体、PV、HB-LED、MEMS、FPD（フラットパネルディスプレイ）、プリント／フレキシブル・エレクトロニクスといった、マイクロエレクトロニクスやナノエレクトロニクスの製造サプライチェーンを対象とする国際的な工業会であるSEMIにおいて、HB-LEDプログラムを支援している。

LEDJ