

大口径基板上のLED製造 —その遅延要因とは？

マーカス・ウェドル

6インチまたは8インチのウエハへと移行することによって、究極的にはより低コストのLEDが実現されるが、業界はその前に、いくつかの技術および物流に関する課題を克服する必要がある。

LEDの製造コスト削減に向けて、大口径(6~8インチ、150~200mm)基板への移行が主要な解決策としてよく取り上げられる。実際、非常に頻繁に話題にのぼることから、大口径への大規模な移行が既に実施されているのかと思う人もいるだろう。この移行は、技術と物流の両方の課題に阻まれ、時間がかかっている。しかし本稿で説明するように、この移行がもたらす最終的な効果は十分に大きいため、LEDメーカーはより大きな基板へと移行し、部品コストは低下し、SSL(Solid State Lighting: 固体照明)の普及はさらに促進される見込みである。

2013年の6インチウエハ上での生産は全体の20%未満にとどまり、8インチウエハの割合にいたっては意味のある数値にも達しないとアナリストらは予測している。これから3年間という期間で見ても、大口径基板は全基板サイズの半分を超える程度としか予測されていない。

この予測は意外に感じるかもしれない。大口径に対する需要は非常に大きいはずだからである。大口径基板はこれまで、LEDチップ価格を低下させるための基本的なコスト削減手段として頻繁に取り上げられてきた。業界全体が大幅なコスト削減を求めており、大口径基板はそれを達成するための主要な手段であるとみなされている。では

なぜ、もっと多くのチップメーカーがこの移行を進めないのだろうか？

この疑問に答えるために、本稿では3つの項目を取り上げる。まず、大口径の真の効果について説明する。2つめに、その効果が本当に素晴らしいものであるならば、なぜより多くのメーカーが移行を進めないのかを議論する。最後に、c軸CHES(controlled heat extraction system)技術など、大口径の普及を促進する可能性を秘めたいいくつかの潜在的な破壊的技術について、8インチ基板の展望とともに解説する。

製造できるLEDチップ数の増加

まずは、より大きいウエハへの移行に伴う主要な利点について考えてみよう。つまり、製造できるLEDチップ数が増加するという利点である。確かにこれは最大の利点だが、残念ながら

次のように誇張されることも多い。「6インチの大口径ウエハは、LEDチップを形成するための表面積が2インチウエハよりも9倍大きい」(図1)。

単純にウエハの表面積に関して言うならば、この記述は確かに正しいが、6インチウエハを使用するだけでチップのスループットが9倍になるというのは、真実とは思えない話であり、実際のところ真実ではない。では何が真実なのか。その疑問に答えるには、LEDチップのレイアウトをより詳しく見てみる必要がある。つまり、ウエハ上のレイアウトと、LEDが形成されるMOCVD(metal organic chemical vapor deposition: 有機金属気相成長)反応炉内におけるウエハのグループとしてのレイアウトである。

「より多くのLEDチップが製造できる」という利点の実情を把握するには、単純に6インチや8インチのウエハの方が大きいということに加えて、いくつかのその他の要素を考慮する必要がある。その要素としては、除外ゾーン、



図1 さまざまな口径のサファイアコア

e-DMプログラムを ご存じですか？

LEDs Magazine Japanのe-DMプログラムなら、業種・職種・購買関与製品・担当製品など、ご希望の対象者に限定してメール配信を行うことが可能です。弊誌読者の皆さまは、LED応用製品の利用やその開発、製造、マーケティングなどに携わっている方だけ。LEDに特化した専門誌ならではの広告プログラムです。

こんなご要望に お応えできます。

- 既存顧客以外に
新製品DMを送りたい
- 製品カタログを送りたい
- 人材募集を行いたい
- 研究者対象の製品
アンケートを実施したい
- 技術者限定で
セミナー告知を行いたい

e-DM 広告掲載料金 (税抜)

データ使用量+配信料 @100円
*セグメント1項目につき +@10円

お問い合わせ・お申し込みは…
株式会社イーエクスプレス
Tel: 03-6721-9890 Email: led@led-japan.jp

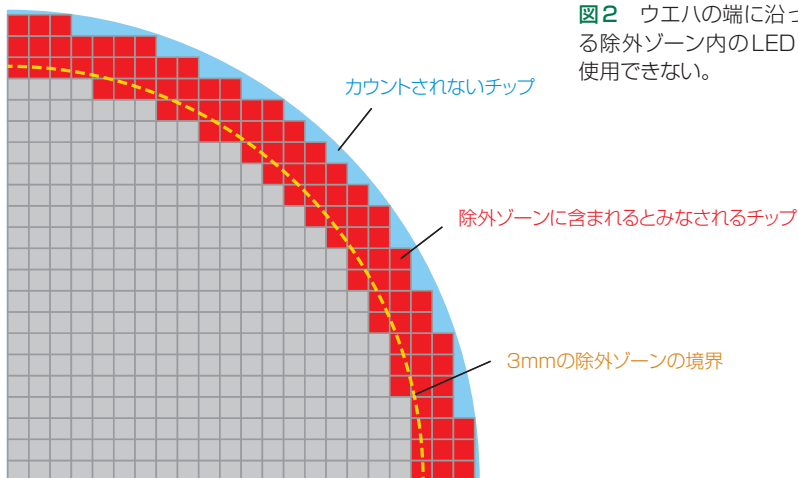


図2 ウエハの端に沿って存在する除外ゾーン内のLEDチップは、使用できない。

	2インチ	4インチ	6インチ	8インチ
除外ゾーン (黒色のリング部分)				
総表面積の比率 (50mmを1とする)	—	4倍	9倍	16倍
純表面積の比率 (50mmを1とする)	—	4.4倍	10.3倍	18.8倍
純LEDチップ数の比率 (50mmを1とする)	—	4.6倍	10.9倍	19.8倍

図3 ウエハが大きくなるほど、1枚のウエハによって製造されるLEDチップ数は大幅に増加する。

LEDチップの形状とサイズ、MOCVD反応炉内のレイアウトがある。以下ではまず、これらの要素を1つずつ説明してから、それらすべてを考慮して真の比較シミュレーションを行い、多様なウエハサイズによって製造できるLEDチップの数について、はるかに合理的な見積もりを示したいと思う。

除外ゾーン

最初に取り上げるのは、ウエハ上の除外ゾーンと呼ばれる部分である。エピタキシャル工程において、LED材料はこのエリアでは正しく形成されず、良好なLEDにはならないため、このエリアのチップはカウントに入れては

ならない。本稿のLEDチップ数のカウントでは、除外ゾーンとして業界標準である3mmを採用する。図2において、赤いチップで示された部分が除外ゾーンである。ウエハの最も端にあり、完全な矩形としてはウエハからはみ出しているチップは、本稿のシミュレーションにおいてまったくカウントされないことに注意してほしい。

除外ゾーンの重要な特徴の1つは、ウエハの口径にかかわらず、端から3mmとなることである。つまり、ウエハ口径が大きいほど除外ゾーンの面積も大きくなる。ただし、ウエハの総表面積に対する割合で考えると、大きいウエハほど除外ゾーンが占める面積

の割合は小さくなる。

したがって、総表面積が9倍となる6インチウエハは、純面積(総面積から除外ゾーンを除いた面積)は実際には9倍以上になる。実質的な比率としては、6インチウエハの純面積は2インチウエハの10.3倍、8インチウエハならば18.8倍ということになる。

ここで、LEDの矩形面積も考慮する必要がある。その矩形は、ウエハの丸い形状に完璧には収まらない。一部のLEDは、部分的に除外ゾーンに入ってしまうために失われる。除外ゾーンと同様に、ウエハが小さいほど、失われるLEDの数の全体に対する割合は大きくなる。LEDを、チップ間のスペースを含めて45×45mil(インチの1000分の1)として計算した実質的な比率は、図3の表に示したとおりである。チップ数の比率は、面積の比率よりもやや大きく、6インチウエハで10.9倍、8インチウエハで19.8倍である。

MOCVD反応炉内のレイアウト

以上から、6インチウエハ上には、LEDチップ数が2インチウエハの9倍というよくある主張よりも、もう少し多くのチップが配置できることがわかった。しかし次に、LEDがMOCVD反応炉の中でウエハのグループとして成長されることを考慮しなければならない。

LEDエピタキシャル工程は、最終的にSSL製品が提供されるまでの全工程の中で最もコストが高く時間のかかる工程の1つである。入力されるのはウエハのグループであり、出力されるのはそれらのウエハ上の数千個ものLEDである。ここで知りたいのは、大口径への移行によって、エピタキシャル工程後のLED数がどのように変化するかである。もちろん、歩留まり(正しく

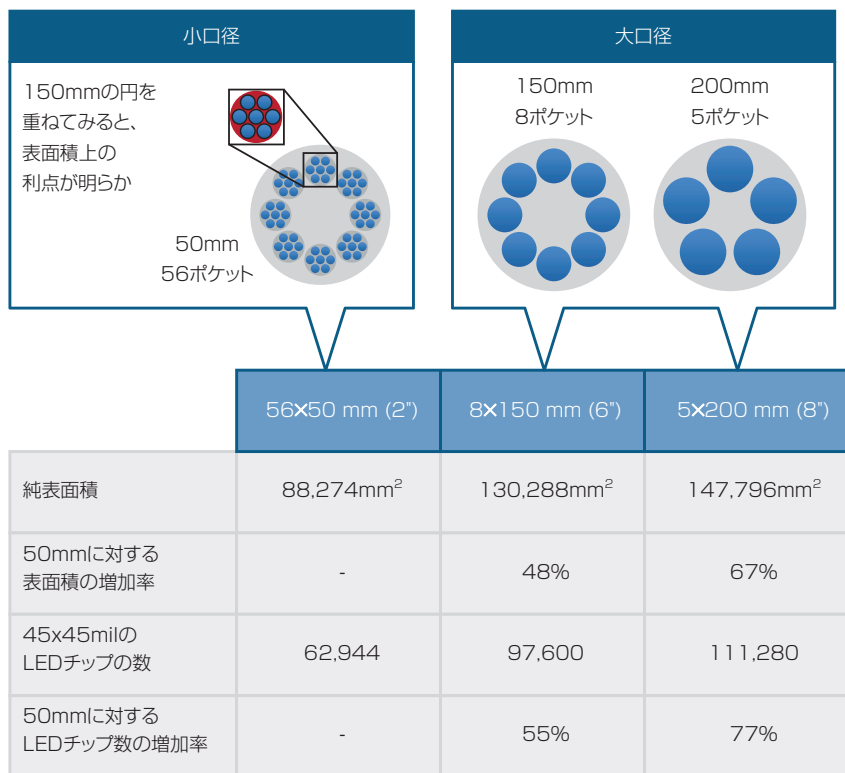


図4 MOCVD反応炉に収容されるウエハ数によって、大きいウエハによる効果が最終的に決まる。

機能するチップの比率)も重要な要素だが、それについては後ほど検討する。

エピタキシャル工程後に得られるチップ数が9倍になると期待してはいけないことは既に述べたが、ここではその理由を説明したいと思う。最大の理由は、口径の小さいウエハの方が、反応炉室に収容できる枚数が多いことである。一般的なMOCVD反応炉には、56枚の2インチウエハを収容することができる。6インチウエハは、同じ反応炉に8枚しか入らない。つまり、7:1の比率で口径の小さいウエハの方が優位ということになる。

最終的な数を等しくするには、1枚の6インチウエハ上に、2インチウエハの7倍のLEDチップを配置する必要がある。しかし、既に述べたとおり、6インチウエハ上には2インチウエハの11倍近くのLEDチップを配置することができる。つまり、6インチウエハ

によるLEDチップ数は55%多い(1.55倍)ということになる。これが、求めていた実質的な真の利点である。最初に示した9倍(900%)という数値よりはかなり小さいものの、同じ時間とコストのMOCVD工程によって得られるLEDチップ数としては、非常に大きな改善であるといえる。図4は、口径の小さいウエハと大きいウエハに対する一般的なMOCVDレイアウトと、それぞれのチップ数を比較して示したものである。

LEDチップのサイズ

考慮しなければならないもう1つの要素は、LEDチップのサイズである。本稿では、ストリート幅、つまりチップ間のスペースを含めて45×45milの矩形を使用して計算を行っている。約1平方ミリメートルとなるこのサイズは、高輝度LED(HB-LED)に対して

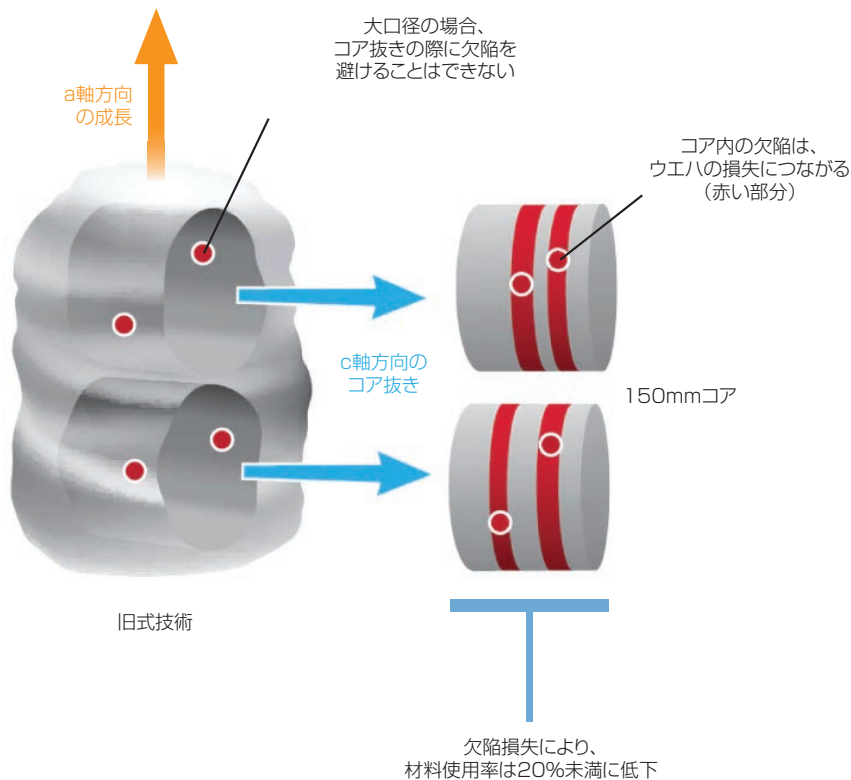


図5 a軸プールから大きなサファイアコアをとると、材料損失が非常に大きく、欠陥も多くなる。

一般的なサイズであるため、比較に適している。ただし、チップサイズが大きくなるほど、口径の大きいウエハによる効果も少し高くなる。例えば、60×60milの矩形を使用する場合、6インチウエハによるチップ数増加率は58%に増大する。

以上では、2インチと6インチのウエハを比較してきたが、他のサイズについても検討しておかなければならない。現時点では、3インチや4インチのウエハ上で製造されるLEDも多い。これらのサイズとの関係はどのようになっているのだろうか。2インチから4インチへの移行による増加率は14.7%にとどまる。これは、反応炉内に14枚の4インチウエハを並べるという標準的なレイアウトを適用した場合の増加率である。4インチから6インチへの移行に伴う増加率はそれよりもかなり高く、35.2%である。

8インチ基板の場合、効果は非常に大きい。2インチと比較してLEDチップ数は77%も増加する。一般的なMOCVD反応炉に8インチウエハは5枚しか収容できないにもかかわらずである。6インチと8インチを直接比較すると、チップ数の増加率は14%である。

以上より、大口径基板によるLEDチップ数増加の正確な効果が判明した。6インチの場合で55%、8インチの場合で77%増加する。これは素晴らしい効果だといえるが、製造できるLEDチップ数に対する本稿のシミュレーションにおいて、まだ考慮していない要素が1つ存在する。LEDチップの歩留まりである。以下では、この重要な要素について説明したいと思う。

歩留まりの改善

基板の前処理からチップのパッケージングにいたるまでのLEDチップ製造

プロセスの各工程において、歩留まりの損失が生じる。各工程の歩留まり損失が積み重なり、最終的なチップコストのかなりの割合を占めることになる。そのため、すべての工程において歩留まりの改善を図ることに現在、多大な注目が集まっている。

大口径LED製造への移行は、製造プロセスの複数の工程における歩留まりの改善に関連付けられている。直接的には、サイズの大きいウエハの方が表面が均一で、エピタキシャル工程に都合がよいという利点がある。間接的には、より優れた製造装置や手法が適用できるという利点がある。歩留まりは複雑な話題になり得るが、以下では簡単に、その潜在的な利点の主要な部分について説明する。

大きいウエハが歩留まりにもたらす直接的な利点の1つは、エピタキシャル工程におけるものである。MOCVD反応炉室の中で、ウエハの端などの物理的な乱れは、ガス流を乱し、歩留まりを低下させる可能性がある。ここで、大きいウエハの方が端部が少なく、表面に乱れが少ないため、都合がよい。コストのかかるエピタキシャル工程において歩留まりが改善されるというのは、重大な利点である。

歩留まりの改善につながる2つめの要因は、最新のプロセス制御や自動化ツールが利用できることによるものである。これらのツールは大口径ウエハを対象に設計され、IC製造において完成化されている。今日一般的に使用されている小口径の製造手法では、手動のプロセスが採用されているために多くの人的介入が必要で、歩留まりの問題を検出できるようなきめ細かい追跡ができない。研究形式の生産環境から真の量産環境への移行が全般的に必要であることが、多くの専門家によって

指摘されている。以下では、この指摘についてもう少し詳しく説明する。

自動化とは主に、ウエハの処理や搬送に機械を使用し、人的要素を排除することを指す。手で運ぶ代わりに自動機械を使用することによって、ウエハを高速に移動することができ、傷つける可能性も低下する。これによって、必要な熟練作業者の人数が少なくて済み、誤った取り扱いによるウエハの損失が低減し、製造工程間の移動が高速になるという利点を得られる。

さらなる自動化に加えて、より多くの最新ツールを採用することによってプロセス制御を改善することができる。プロセス制御とは、生産プロセスの任意の部分における歩留まり損失の原因となっている問題を検出および予測するために、データ解析を使用することである。これには、結晶成長工程にまで遡ってプロセス全体にわたって基板を追跡および解析することが必要となる。プロセス制御は、多様な生産ツールによって記録された解析データも取り入れて行われる。

プロセス制御の導入は、LED業界の前進に向けて必要なステップであると思なされることが多い。自動化と同様に、プロセス制御の導入に必要なツールは大口径基板を対象に設計されているため、大口径への移行によってもたらされる効果は、LEDチップ数の増加だけではないということになる。大口径ウエハ製造による歩留まり改善に向けた業界の動向については、「LED wafer and automation standards are on the fast track, ready for more industry feedback」(急ピッチで進められるLEDウエハと自動化に関する規格策定、業界からのさらなるフィードバックを受け入れる体制が整う)の記事(www.ledsmagazine.com/features/8/10/9)を

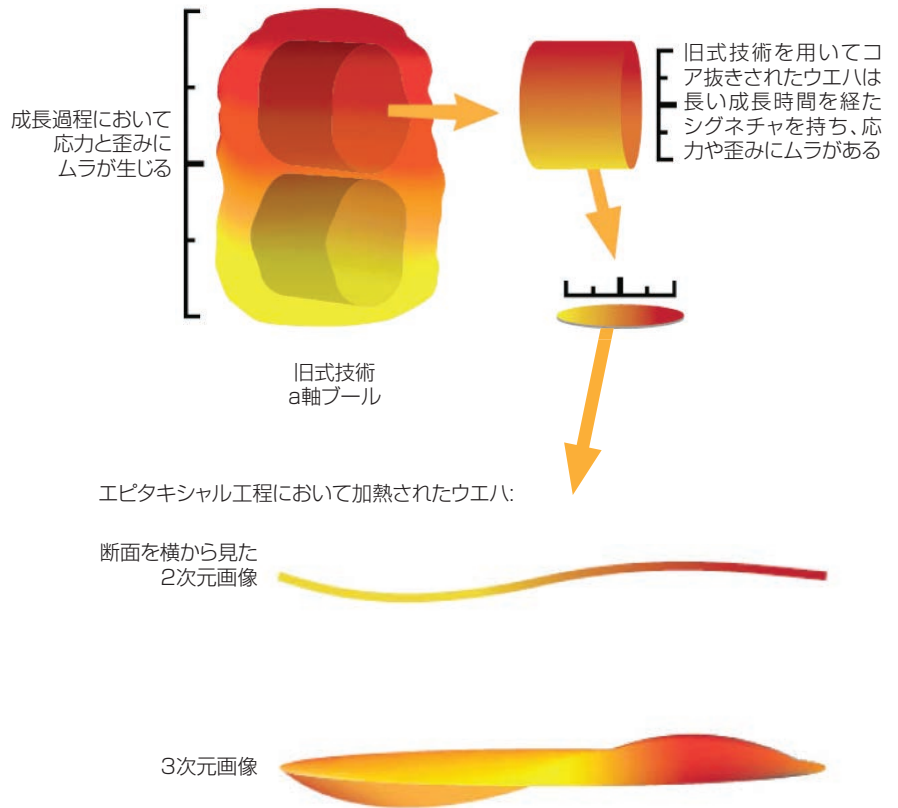


図6 a軸プールから得られたウエハは、MOCVD工程において湾曲してしまう。

参照してほしい。

市場状況

以上から、大口径ウエハへの移行によって、MOCVD工程あたりの製造チップ数が増加できることと、複数の工程において歩留まりの改善が得られることがわかった。しかしそれにもかかわらず、2013年にはまだ、LEDの80%以上が小口径基板を使用して製造されると業界で予測されているのはなぜだろうか。その理由としては、厳しい市場状況と、大口径基板の競争力のあるコストでの供給を阻む技術的課題の2つが挙げられる。

2インチ、3インチ、4インチウエハの価格は、供給過剰の状態と予測を下回る需要によってこの2年間で著しく低下した。同時に、製造プロセスにおけるPSS(patterned sapphire substrate:パ

ターン化サファイア基板)と呼ばれる工程によって、LEDの性能が向上した。この2つの要因によって、小口径にとどまったまま需要が高まるのを待つことが、魅力的な選択肢となっている。しかし、一部の大企業は、このような状態にもかかわらず先手を打って移行を進め、需要の増加に応じて直ちに生産を増加できるように準備を整えている。

技術的障壁

大口径基板の普及を阻む2つめの障壁として立ち上がるのは、一連の技術的な問題である。まず、基板作成の最初の工程であるサファイア結晶成長に、いくつかの課題が存在する。図5に示すように、HB-LEDにはc軸ウエハが必要であるにもかかわらず、HB-LED用のサファイアは現在、一般的にはa軸上で成長されている。a軸サフ

ファイアブルからc軸ウエハを得るには、コアを横方向に取ることが必要となり、サファイアのかなりの部分が無駄になってしまう。

さらに、今日のa軸サファイア成長技術では、大口径のコアを抜く際に欠陥を避けることができない。6インチまたは8インチのコアは体積が非常に大きいので、欠陥を回避することは不可能で、コアを短くするか廃棄することが必要になる。横方向のコア抜きと欠陥部分の廃棄による合計損失は、材料の80%以上となる。8インチの場合は、90%以上が無駄になり、生産コストは2倍になる。

a軸成長によるもう1つの問題は、得られるウエハの表面全体にわたって応力と歪みにムラが生じることである。ウエハは、ブールを横方向に抜いたコアからできており、ブールはa軸に沿って成長されているため、ウエハ自体の表面には、長い成長時間を経たシグネチャが現れる。ウエハが加熱されるエピタキシャル成長の過程において、このシグネチャによる影響は顕著になる。

図6に示すように、ウエハは曲がり、不均一なパターンや湾曲が生じてしまう。MOCVDエンジニアがこの湾曲に対処するのは非常に難しく、ウエハをより厚くしてみたり、応力を緩和するレイヤを取り入れたりといったいくつかの回避策がこれまで試されてきた。これらの手法によって、生産コストは高まり、複雑さも増す。湾曲に対処しない場合、エピタキシャル工程におけるLEDチップの歩留まりは低くなってしまふ。

最後の技術的問題は、ウエハのスライスおよび研磨と、PSS手法の適用におけるものである。スライスと研磨は難しい処理であり、エピタキシャル工

程の歩留まりを高めるために適切に行われる必要がある。大きいウエハはサイズが9~16倍になるため、これらの処理は格段に難しくなる。

PSSの適用にも同様の問題が存在する。また、6インチ未満の限られたサイズの領域にしかパターンをシームレスに適用することはできないというさらなる問題もある。PSSを6インチウエハに適用するには、ステッパー(半導体製造ツール)によって複数のパターンを適用しなければならない。それは、シリコン業界では一般的に行われていることである。しかし、HB-LEDの場合は、複数のパターンを適用した端の部分に正確に一致させなければ、LEDの歩留まりが低下してしまう。ここで求められる精度は、非常に達成が困難であることが明らかになっている。

上述の市場状況と技術的課題の障壁によって、大口径基板の大量普及を阻む複数の制約が生じている。将来的には、より大きな基板を使用しなければ市場が求めるスループットと歩留まりを達成できない状況が訪れ、その結果

として技術的課題が克服されることになるだろう。複数のティア1メーカーが既に移行を終え、業界の大多数に対して優位な地位にあることは、これらの課題が克服できるものであることを証明している。

基板に関する潜在的破壊的技術

HB-LEDの製造が、最終的には大口径基板へと移行することは間違いのない。問題はどれだけ早くそれが生じるか、また、その基板にどのような材料が使用されるかである。本稿のこの最後の部分では、これらの疑問に対する回答となる可能性のあるものを簡単に紹介する。

冒頭で述べたとおり、大口径基板の普及率は現時点では低く、移行完了までに何年もかかると予測されている。しかし、従来のサファイアに代わる基板の進歩によってこの移行が加速するか、あるいは、一部の企業に対するニッチな手段が開拓される可能性もある。まずは、サファイアに対する技術を紹介しよう。

本稿で示した最大の課題は、a軸成長に起因して材料の使用率が低く、欠陥率が高いため、大きいウエハはコストが高くなってしまふことであった。c軸上で直接成長させることによって無駄を大幅に削減することのできる、代替の成長技術が存在する。また、多大な欠陥を回避することのできる成長技術も提供されている。

c軸成長(LEDの分野では軸上成長とも呼ばれる)の特徴を持ち、欠陥率が低いサファイアは、大口径向けに非常にうまく最適化されている。c軸CHES技術を表す図7からわかるように、材料使用率が低い問題と欠陥率が高い問題の両方が一度に解決されるとともに、ニアネットシェイプのブールが得

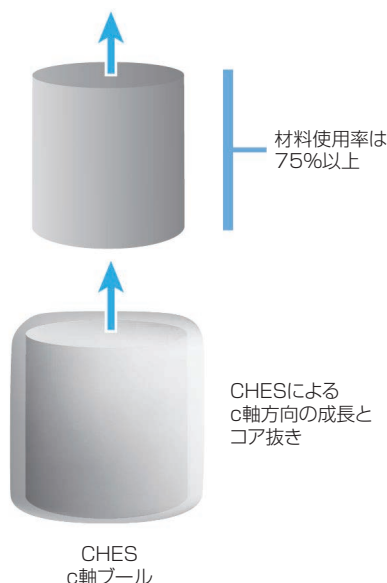


図7 c軸サファイアブールにより、材料使用率は高まり、欠陥は減少する。

られるというさらなる利点がある。これによって、6インチと8インチの両方に対し、材料使用率は75%以上となる。

a軸成長サファイアに見られたエピタキシャル工程における湾曲の問題も、c軸CHESウエハでは軽減される。c軸CHESウエハは、表面全体にわたって単一時間のシグネチャを持つためである(図8)。このような利点により、より多くのメーカーが大口径へと移行するにつれて、成長技術もc軸の欠陥率の低い成長へと移行することが期待される。

シリコン、炭化ケイ素、窒化ガリウム(GaN)など、サファイアに代わる基板も研究されている。これらの各基板を製造に採用するLEDメーカーも少数ながら存在するが、これらの代替基板はサファイアよりもコスト効果が高いわけではない。各基板にそれぞれサファイアに勝る利点があるが、そのうちのいずれかがサファイアに代わって広く採用されるようになるには、複数の飛躍的な進歩が必要である。代替基板のうち、成功する可能性が最も高いと現時点で予測されているのはシリコンである。

LEDの潜在市場は非常に広範であるため、サファイアが優勢を維持したまま、これらの代替基板が一部の分野で採用されることになる可能性はある。例えば、GaN基板には、コストは非常に高くなるものの、チップあたりの性能が高くなるという利点がある。したがってGaN基板は、単一の高輝度なLEDチップが望ましかったり必要であったりするニッチな分野で採用される可能性がある。

6インチの次のウエハ口径は8インチである。8インチウエハは、LEDチップ数がさらに大きく増加するととも

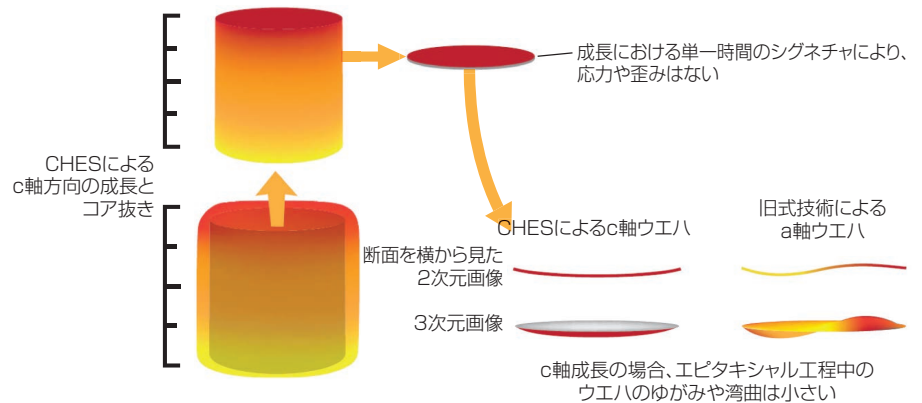


図8 c軸ウエハは、エピタキシャル工程中の歪みと湾曲が小さい。

に、歩留まりをさらに改善できる可能性がある。しかし、上述と同じ問題に加えて、サファイア基板のコストが、a軸成長手法を使用する場合は6インチの2倍になるという問題も抱える。したがって、8インチウエハ以降には、これらの代替技術(c軸上で成長させたサファイア、シリコン、またはその他の基板)のうちのいずれかが主流になることが予測される。

障害と利点

本稿では、大口径に基づくLED製造への移行によって、MOCVD工程あたりのLEDチップ数が、6インチウエハの場合で55%、8インチウエハの場合で77%増加することを示した。チップ数の増加に加えて、エピタキシャル工程の歩留まりの改善、自動化、プロセス制御によって、製造プロセス全体にわたって歩留まりが改善される。

非常に規模の大きいLEDメーカーを除いて、このような利点が広く享受されるに至っていないのは、市場と技術にいくつかの障壁が存在するためである。これには、a軸サファイア成長技術、市場における景気の低迷、PSSの使用に関する問題が含まれる。しかし、新しいc軸成長技術は、大口径サファイア基板を供給するための最適な

手段となっている。シリコンなどの他の基板材料は、ニッチな用途向けに一部のメーカーに採用される可能性が高い。より大きいウエハへの移行は、8インチという次の段階へと継続していく見込みである。

大口径基板が、HB-LEDのコスト削減と性能向上に向けた重要な要素であることは、複数の大手メーカーによって既の実証されている。その1例としては、「Philips Lumileds announces workhorse Luxeon T LED family」(フィリップス・ルミレッズ社、主力LEDファミリ「Luxeon T」を発表)(www.ledsmagazine.com/news/9/12/7)を参照してほしい。

それにもかかわらず、多くの企業が、次の需要の波が来るまで小口径ウエハにとどまろうとしている。しかし、大口径LED製造によって得られる競争力を、先手を打って手に入れておこうと考える企業は、より効率的かつ柔軟に需要に対応し、将来の成功をつかむことになるだろう。

著者紹介

マーカス・ウェドル(Marcus Weddle)は、米国ニューハンプシャー州ナシユアを拠点とするARCエネルギー社(ARC Energy)のマーケティングマネージャ。同社は、LED、SOS、光学/商用の産業市場向けにCHESサファイア結晶成長炉と処理システムを製造している。