PSSベースのLED開発／量産を支える２種類の計測装置

リ・シャオメイ

高輝度LEDの製造に用いられるPSS（パターン化されたサファイア基板）の測定には、原子間力顕微鏡（AFM）と白色光干渉計（WLI）のそれぞれに異なる特性が有用である。

高輝度（HB：High Brightness）LEDの需要拡大を受けて、LEDメーカーは製造の効率化とデバイスの高性能化を迫られている。これらを達成するには、高精度の計測装置が必要となる。膜厚の測定や、基板／層の粗さの測定、そしてパターン化されたサファイア基板（PSS：Patterned Sapphire Substrate）における詳細な検証などには高精度の計測装置が不可欠である。

本稿では、現在、そうした高精度の測定に使用されている2種類の計測装置を取り上げる。原子間力顕微鏡（AFM：Atomic Force Microscope）と白色光干渉計（WLI：White Light Interferometer）である。特にWLIは非常に高速な測定が行えることから、生産量が急増している比較的新しいデバイスの品質管理（QC）や工程管理に欠かせないツールになると考えられる。本稿では、これら2種類の異なる計測装置を比較し、それぞれがHB LEDの開発から量産までのどの工程に適しているのかを詳しく説明する。

PSSの利点

サファイア基板に窒化ガリウム（GaN：ガリウムナイトライド）層を成長させた従来のGaN系LEDでは、GaNと空気それぞれの屈折率の差が大きい。そのため、デバイスから取り出せる光の量は全反射によって制限される。この制限による影響を解消できれば、HB LEDメーカーは、最も重要な性能パラメータである輝度と発光効率を確実に改善できる。

そこで、光の取り出し効率を高めるために、表面のランダムテクスチャリング技術やフリップチップ技術、フォトニック結晶技術など、さまざまな手法が開発された。そうした手法の1つがPSSである（**図1**）。このPSSは、光の取り出し効率が高いことだけでなく、ほかにも優れた利点を備えていることから、広く使用されるようになってきている。光の取り出し効率以外の利点としては、まずコストを抑えられることが挙げられる。PSSは、通常の研磨処理を行ったサファイアウェーハ上に、“枯れた技術”であるフォトリソグラフィの手法を適用するという製造プロセスで処理できるからだ。

もう1つの利点は性能面にある。PSSでは、高輝度化を実現可能なGaNエピタキシャル層を形成できる。特にGaN層では、層間の格子の不一致や熱膨張率の違いによって転移が起こりやすい。PSS構造は、こうした欠陥が入り込むのを最小限に抑える格子として形成される。その形状は円錐形か半球形かピラミッド形である（**図2**）。

LEDの最終性能は、基板と各層の品質に大きく依存する。特に重要な要素は、ウェーハ表面／背面の粗さ、各エピタキシャル層の粗さと均質性、エピタキシャル層の段差やピンホールなどの欠陥の有無である。PSSの場合、サファイア上のドットの寸法（高さと幅）とピッチが正確に形成されていることも重要である。そのため、試験においては、異常な形状のドットやドットの欠損が存在しないことを確認しなけれ

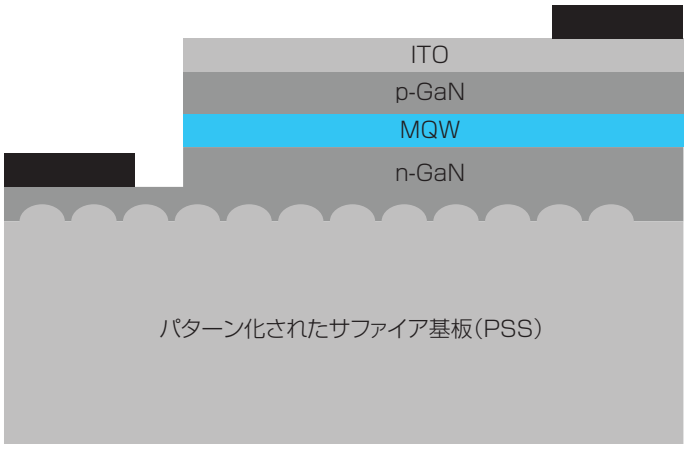

図1　典型的なLED製品は、サファイア基板の表面にGaN層を成長させ、それを積層した構造で製造される。パターン化されたサファイア基板（PSS）を用いた場合、光の取り出し効率を改善できる。

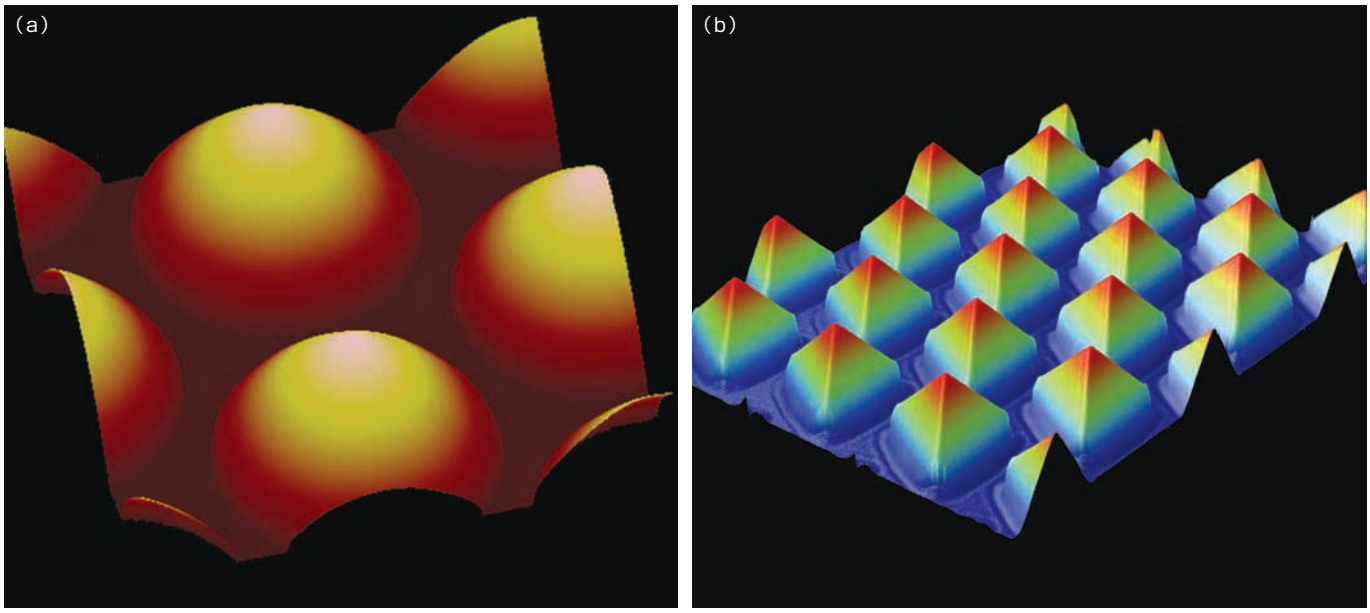

図2　PSSの細部の仕様はメーカーによって異なるが、一般的には円錐形か半球形かピラミッド形の構造を持つ。
(a) AFM(ブルカー社のDimension Edge PSS)で取得した画像
(b) WLI(ブルカー社のContour GT-X8 PSS)で取得した画像

ばならない。

AFM:“究極”の表面形状測定装置

現在利用できる表面形状測定装置の中で最も分解能が高いのはAFMである。その分解能の高さから、現在、AFMはウェーハメーカーとLEDメーカーの両方で標準的なツールとして広く使用されている。

AFMでは、超小型の片持ちばり(カンチレバー)の先端に取り付けられた微細な探針が、試料の表面に接触することで測定を行う。この探針は、試料の表面との原子/分子間力による作用を受ける。探針と試料の表面は最初は引き付け合うが、探針が表面に触れると反発する。この片持ちばりの位置と動作を、レーザー光線を使って測定するというものである。

試料(探針の下にある試料)をラスター走査することで、試料の表面の形状図を作成することができる。水平(X-Y)面の分解能は主に探針の半径によって決まる。多くの場合、この半径は2nm程度である。垂直(Z)方向の分解能は探針とは直接関係がなく、一般的には0.05nm程度となる。

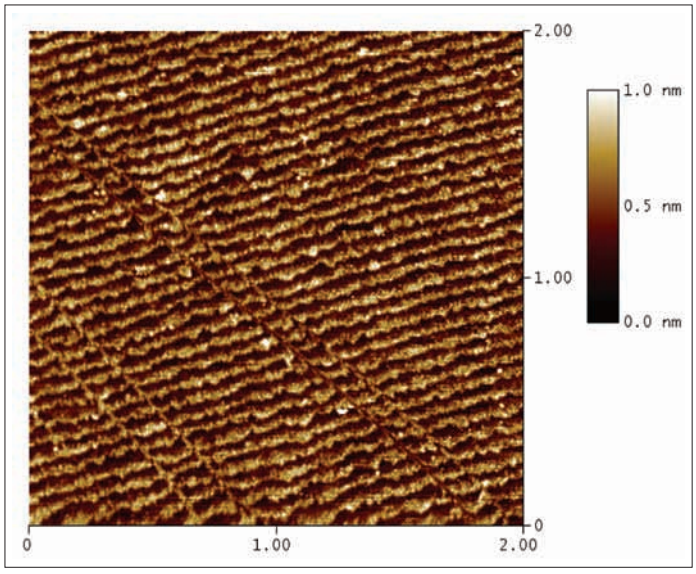

図3　AFMは完全な3次元の分解能を実現している。この画像は、研磨されたサファイアウェーハの表面形状を2μm×2μmの範囲で走査した例である。ブルカー社のDimension Edge PSSによって計測した。

基板(ウェーハ)メーカーは、特に研磨処理の結果の測定にAFMを利用している(**図3**)。研磨処理の目標値としては、表面粗さR_A(rms)が0.05nm程度と設定される。R_Aは、表面の高さの平均値からの偏差を合計してそれを平均した値であり、多くの業界やアプリケーションで広く使用されている。

AFMは、それほど高速な測定が行えるわけではないため、処理量には限界がある。ただ、研磨処理の評価では試料のすべてを測定する必要はない。研磨処理についてはすでに十分な特性評価が行われているので、処理の結果は予測可能だ。したがって、統計的な処理

を行うのに十分な抜き取り検査が行えればよい。同様に、LEDメーカーは、十分に実績のあるベンダーが供給する従来型のウェーハを使用するのであれば、多くの試験を実施する必要はないと考えられる。このような場合、AFMは最も有力で好ましいツールだと言える。

また、AFMによる測定は、エピタキシャル層の形成において最も信頼できる基準となる。AFMが提供するX-Y-Z測定は、段差やピンホールなど、膜の欠陥を見つけるのに最適である。測定速度についても、新規プロセスの開発時やプロセスの変更時にエピタキシャル層の粗さを測定する用途であれば十分なレベルだと言える。プロセスに問題がないことが実証されれば、AFMは最終製品の統計的な抜き取り検査において有用なツールになり得る。

しかし、PSSをはじめ、テクスチャ(模様)を持つウェーハの製造については事情がやや異なる。PSSの表面の微細パターンは非常に重要であるが、100%の歩留まりで製造できるわけではない。そのため、すべてのPSSウェーハを対象とし、できればウェーハ上の複数の個所について試験を行うのが理想的である。例えば、リソグラフィ処理において、場所によって焦点が合わないといったことが起きるからだ。

それでも、研究開発や一部の製造アプリケーションにおいては、AFMはPSSの測定に有用なツールである。なぜなら、AFMは、必要に応じて、傾斜などの表面形状の完全な3次元画像を原子レベルの分解能で提供できるからだ。実際、米ブルカー社(Bruker)などのAFMメーカーは、PSSアプリケーション専用のAFMを開発している(例えば、同社の「Dimension Edge PSS」など)。そうした製品は、同時に最大9枚の2インチ～6インチ(5cm～15cm)ウェーハを自動測定する機能を備えている。また、開発技術者とオペレータ(あるいは試験技術者)のそれぞれに適した形で利用できるソフトウエアも提供される。開発技術者は、合否の基準以外に、各種の測定プロトコルを組み込んで利用することができる。一方、オペレータは、単純な合否診断ツールとして利用することが可能である。

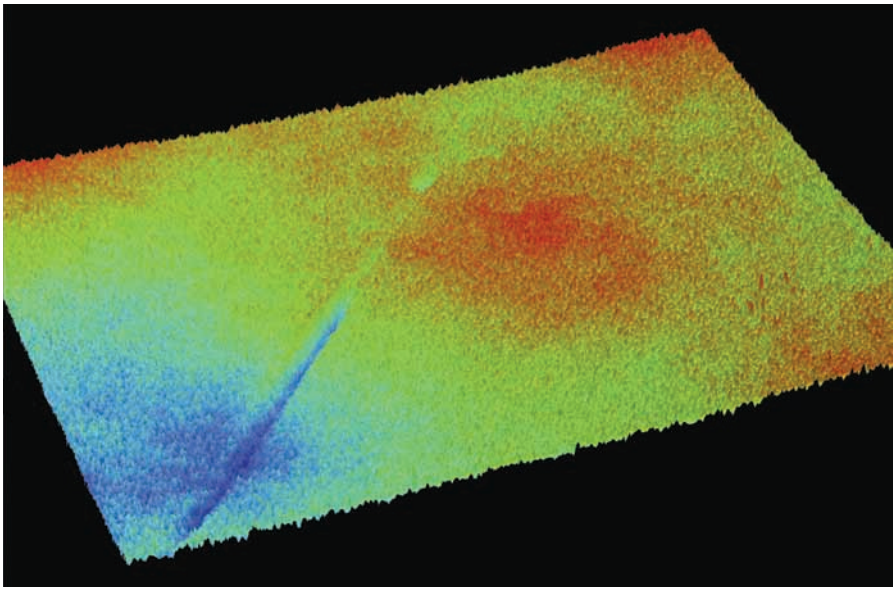

図4　サファイア基板の粗さをWLIによって測定した結果。研磨による傷が見て取れる。視野の範囲はμmのレベル。

WLI:量産用途に適用可能な高速性

生産量が多い場合には、PSS用に設計されたAFMでも、試験のプロセスにおけるボトルネックになることがある。そのような量産アプリケーションには、WLIのほうが適している。WLIを利用すれば、PSSの高さと幅、ピッチを計測することで、欠陥を容易に見つけることができる。また、表面の粗さや、1.5μm以上の光透過膜の厚さを測定するのには理想的なツールだ。

WLIは、光を使用して計測を行う高分解能のルーラー／深さゲージである。計測は非接触で行われ、対象物が破壊してしまうことはない。一般的な光学顕微鏡と似ており、試料台の上に対象物を設置して測定する。白色光源の光を対物レンズに送り、部分反射ミラーによって光のパスを2分割する。一方のパスは試料の表面に焦点を合わせ、もう一方のパスは極めて平坦な内部の参照面の方向に曲折させる。2つの反射光が再び重なったとき、明るい線と暗い線の縞模様が現れる。この縞模様は試料表面の形状に直接的に対応しており、地形図の等高線に似たものとなる。そして、この縞模様は、試料の中で顕微鏡の焦点が完全に合っている個所にのみ急な曲線として現れる。

WLIによる測定では、内蔵のコンピュータにより、顕微鏡の焦点が合っているすべての位置がたどられ、デジタルカメラに縞模様の形状が取り込まれる。縞模様が最も鮮明な部分が、まさに焦点深度であるということになる。次に、内蔵のソフトウエアが、取得したデータを使用して視野全体の3次元表面形状を数秒以内に算出し、それを図として表示する。AFMが逐次処理ツールであるのに対し、WLIは表面の

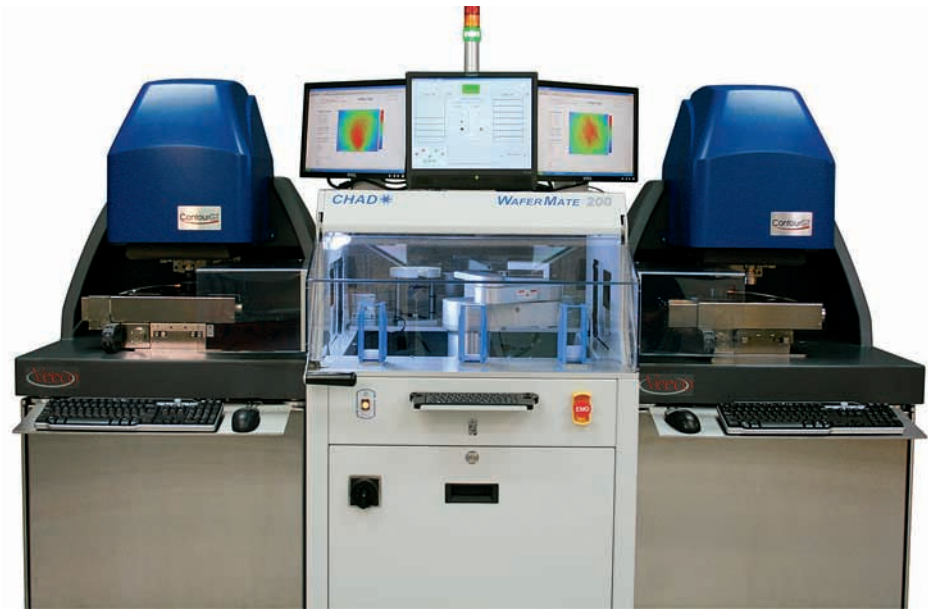

図5　サファイア基板用のウェーハ処理装置と、2台のWLIを一体化することで、試験の効率を高めることができる。

数万カ所（画素）を同時に処理できる。こうした高速処理によって、WLIは高いスループットが要求される製造環境においても、高密度（例えば100％）の抜き取り試験に最適なプラットフォームとなっている。

WLIは、極めて高いダイナミックレンジをサポートする。垂直方向の分解能は0.1nmにもなり、対応可能な高さの範囲は最大8mmに及ぶ。X-Y平面（水平方向）のWLI画像の解像度は、顕微鏡の対物レンズの選択によって決まる。高性能のWLIは、表面の様子や形状を表す図を作成できるだけでなく、表面粗さの平均など、一般的な統計的パラメータの算出も行える（**図4**）。

WLIは、すでにHB LEDの各種測定に対して有用なツールとして認められている。例えば、ITO（酸化インジウムスズ）膜の粗さやGaN膜の厚さの測定、PSSにおけるピッチ／幅／高さ／均質性の測定、PSSの欠陥検査（ドット高さの検証）、サファイア基板の表面／背面の平面度の測定などが行える。また、PSSウェーハのピッチ／幅／高さの測定や欠陥検査の分野に使用されていることは、WLIの測定速度が非常に優れていることの証明でもある。

PSSの製造環境において、各種の試験をシームレスに統合するのに必要となるのは計測装置の性能や速度だけではない。ウェーハ処理の自動化や、試験技術者によるソフトウエアの運用に対応でき、カスタマイズ可能な統計分析機能やデータの保存機能を備えていることも要求される。

現在、PSS専用に新世代のWLIが開発されている。そのような製品には、WLIとしての実用的な基本機能と、PSSの形状測定用に完全に最適化されたソフトウエアアルゴリズムが統合される。その一例としては、ブルカー社の「Contour GT-X8 PSS」が挙げられる。同製品を米CHADインダストリーズ社（CHAD Industries）のウェーハ処理システム「WaferMate」と一体化することにより、製造環境の品質管理に向けたターンキー方式での運用や、基板の自動処理装置とのシームレスな統合を実現できる。さらに、**図5**に示すようにWLIを2台設置することで、スループットを2倍に高めることが可能になる。

PSSの測定を行う場合、WLIの最適な拡大倍率は約230倍とされている。この倍率は、視野と、合否試験／工程のフィードバックに要求されるX-Y方向の分解能の面で最適な値のようだ。例えば、1回の測定当たりの視野が20μm^2の場合、2インチウェーハでは13カ所をわずか2分以内に分析することができる。言い換えれば、1時間当たりに、60枚以上のウェーハを処理できるということである。

20μm^2の視野は、HB LEDの仕様により、PSSの20～100パターンに相当する。しかも、高さの3σ（標準偏差の3倍）は6nm未満、幅の3σは10nm未満である。装置内部の自動調整機能が働くことで、このような優れた測定能力が得られる。高さ、幅、ピッチの3σは、5日間で10nm未満である。

AFMとWLIは“適材適所”で

従来型のLEDについては、LEDメーカーにとってもウェーハメーカーにとっても、AFMが最適な表面形状計測装置であることに変わりはない。またAFMは、PSSを使用するHB LEDなどのための新しい製造プロセスの開発や試験には理想的なソリューションだと言える。

しかし、HB LEDが量産に移ったときには、WLIが提供する高密度の抜き取り試験のほうが望ましい場合も多い。また、WLIの用途は広く、表面粗さや光透過膜の厚さの測定といったHB LEDの計測／品質管理にも適したツールだと言える。

著者紹介
リ・シャオメイ氏（XIAOMEI LI、xiaomei.li@bruker-nano.com）は、ブルカー社のNano Surfaces Divisionに所属する（http://www.bruker-nano.com）。

LEDJ