LEDの光抽出を改善するパターン化基板

ドングン・コ、ヤコブ・ユーン、ジャンホ・ソ

パターン化ウエハは、欠陥密度と内部全反射損失を低減することによってLEDの光抽出を改善することができる。

窒化物半導体を用いたLEDは、一般照明、自動車のヘッドライトや交通信号から、HDTV、スマートフォン、タブレットといった民生機器のバックライト、大小さまざまなディスプレイにいたるまでの広範囲にわたる製品の標準的な光源として、急速に採用が進んでいる。しかし、LEDの性能とコストが未だに、LED技術の広範な普及の妨げになっている。実際、部品価格が引き下げられ、光出力が高まれば、民生市場における採用は大幅に加速する可能性がある。LED チップメーカーは、パターン化サファイア基板の製造手法が、光抽出を最大限に高め、LEDの広範な普及を妨げる障害を克服するのではないかと期待を寄せている。

LED基板またはウエハに適用されるパターンは、2つの方法で光出力を大幅に増加させることができる。まず、エピタキシャル欠陥密度を低減し、その結果としてアクティブな量子井戸層の発光性能を高めることができる。2つ目に、パターン化サファイア基板は光子を拡散させることができ、それによって内部全反射（TIR：Total Internal Reflection）による光損失を低減することができる。

研究者らは、パターン（多様な形状とサイズの周期的な構造）をサファイア基板の表面に作製する方法を開発している。円錐形（コーン）、半球形（ドーム）、ピラミッド形、柱形（ピラー）といった様々な形状の周期的な構造を持つこれらのサファイアウエハは、PSS（Patterned Sapphire Substrate：パターン化サファイア基板）と呼ばれる。

業界で現在実用化されているPSS作製手法としては、乾式プラズマエッチングと湿式化学エッチングという2つの異なる製造プロセスがある。現在、大多数のPSS製品は、乾式プラズマエッチングによって製造されている。この手法は本質的に、精度と均一性が効果的に制御できるためである。本誌では、誘導結合プラズマ（ICP：Inductively Coupled Plasma）の乾式反応性イオンエッチング（RIE：Reactive Ion Etching）によるPSS作製手法を取り上げる。

10社を超える最先端LEDメーカーとともに100mmと150mmのPSSに取り組んできた経験から、米ルビコン・テクノロジー社（Rubicon Technology）は有効なPSSの要件範囲を明確に把握している。最も重要な要件としては、パターンのサイズ、形状、アスペクト比（形状の幅に対する高さの比率）に加えて、ウエハ全体にわたる均一性と、複数のウエハ間の一貫性がある。

LED業界におけるエピタキシ工程には高度なカスタマイズが適用されることから、あらゆる場合に対して有効な、単一の最良のPSS作製手法というものは存在しない。多種多様なパターン化設計が存在し、PSS設計が収束される兆しはない。一般的なパターン形状としては、円錐形、半球形、正方形または三角形のピラミッド形などがある。学術研究により、パターンサイズが小さいほど（100～1000nm）、発光効率が高くなることが実証されているが、今日のLED業界で標準的に採用されているのはまだ、3～4μmの形状サイズである。

これらの重要な特性に影響を与える主要なプロセスパラメータは、フォトレジスト（PR：Photoresist）マスクの寸法精度と均一性、PRマスクに対するサファイアエッチングの選択性、バイアスRF電力、ICPプロセス圧力、プラズマの均一性を実現するRFコイル設計、トリフルオロメタン（Trifluoromethane：CHF_3）と三塩化ホウ素（Boron Trichloride：BCl_3）の割合、そして基板温度である。

光抽出の改善

光抽出効率が低いことは、高輝度LEDの構築における深刻な問題である。基板上のパターン化により、TIRのエスケープコーンの外側に放射された多数の光子を拡散させてコーン内に戻し、抽出される光量を増大させることができる（**図1a**）。これによって、エスケープコーンの臨界角を大きくするのと同等の効果が得られる（図1b）。その結果、光抽出効率が最大で30%高まることが明らかになっている。

光子は、電子と正孔の再結合によってアクティブな量子井戸層から放射され、LEDダイから自由空間へと放出される。アクティブ層から放射されたすべての光子がLEDの光出力として抽出されるというのが、理想的な状態である。しかし実際には、多数の光子がさ

まざまな理由によって、LEDダイから放出されないままとなる。

理想的な光抽出を妨げる主な要因の1つは、窒化ガリウム（GaN）の屈折率が自由空間の屈折率よりも高いこと（約2.5：1.0）に起因するTIR効果である。アクティブ領域で生成された多数の光子が、反射によってダイ内部に封じ込められ、最終的には熱として消散してしまう。TIRの臨界角で定義される光エスケープコーンで説明すると、エスケープコーン内に放射された光だけがLEDダイから放出され、コーンの外側に放射された光は内部に封じ込められる。

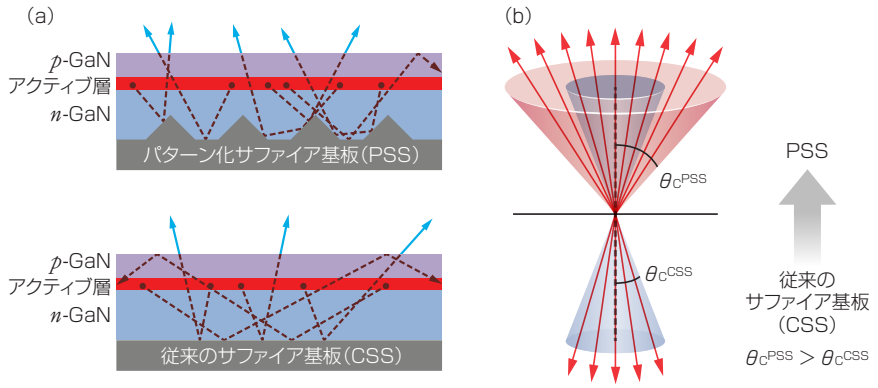

図1　PSSは、光子を拡散して（a）、実質的に光エスケープコーンを拡大する（b）。これによって、光抽出効率を30％高めることができる。

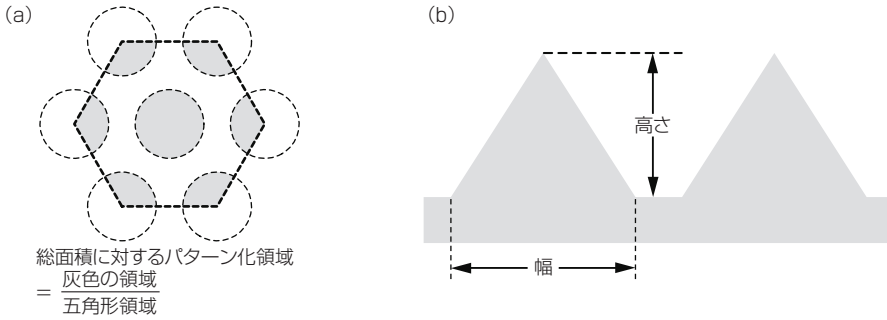

図2　総基板面積に対するパターン化領域の割合は、五角形領域に対する灰色で塗りつぶされた領域の割合で算出される（a）。アスペクト比とは、パターン構造の幅に対する高さの比率である（b）。

発光変換効率の向上

熱、機械、化学的特性の観点から、サファイアは、III-V族窒化物半導体のエピタキシャル成長用に優れた基板である。しかし、III-V族窒化物（ウルツ鉱型構造）とは結晶構造が異なる（コランダム型構造）だけでなく、窒化物との結晶格子の不整合がかなり大きい（約15％）。その結果、窒化物エピタキシャル層には必然的に、1cm^{2}あたり10^8～10^{10}個という多数の貫通転位が存在する。貫通転位は、エピタキシャル層の線欠陥であり、薄膜の結晶品質の劣化の度合いを表す。このような欠陥は分析上、光学顕微鏡におけるエッチピット密度（EPD：Etch-Pit Density）によって特性評価される。光学性能のX線ロッキングカーブ法で測定される、半値全幅（FWHM：Full Width at Half Maximum）によって特性評価される場合もある。

サファイア表面のパターン化によって、このような貫通転位の密度が低減され、窒化物のエピタキシャル成長が改善される。転位が減少するのは、PSSが横方向の成長を促進するためと理解されている。つまり、基板面と平行な方向に成長が進む。貫通転位は、エピタキシャル成長初期の過程で、従来の平らなサファイア基板またはパターン化サファイア基板上の核生成層によって生成される。PSS上でエピタキシャル成長の横方向成分が促進されることにより、貫通転位密度が低減することは、多くの研究者が透過型電子顕微鏡（TEM：Transmission Electron Microscope）によって観測している。

電子と正孔は転位線で非放射的に再結合するため、特にアクティブ領域における転位密度の低減は、発光変換効率（内部量子効率とも呼ばれる）を改善するための最も重要な要件の1つである。一般的にはPSSによって、アクティブな量子井戸層のエピタキシャル品質が改善され、発光変換効率は30％程度高くなる。ただし、パターンのサイズ、形状、品質に加え、各パターン設計に対する各社独自のエピタキシャル最適化によって、かなりのばらつきが生じることが観測されている。

効果的なPSS設計

PSSを設計する際に、LEDチップの光出力を最適化するために検討すべき点は、主に2つある。1つ目は、いかにして横方向の成長を最大限に促進して、エピタキシャル成長における貫通転位をより効果的に抑制するかである。2つ目は、いかにして拡散効果を最大限にして、光抽出を高めるかである。

総面積に対するパターン化領域の割合と、幅に対する高さの比率であるアスペクト比は、PSS設計において基板面に平行な横方向のエピタキシャル成長を促進するための、2つの主要な項目である。これらのパターンパラメータを図式化したものを**図2**に示す。総

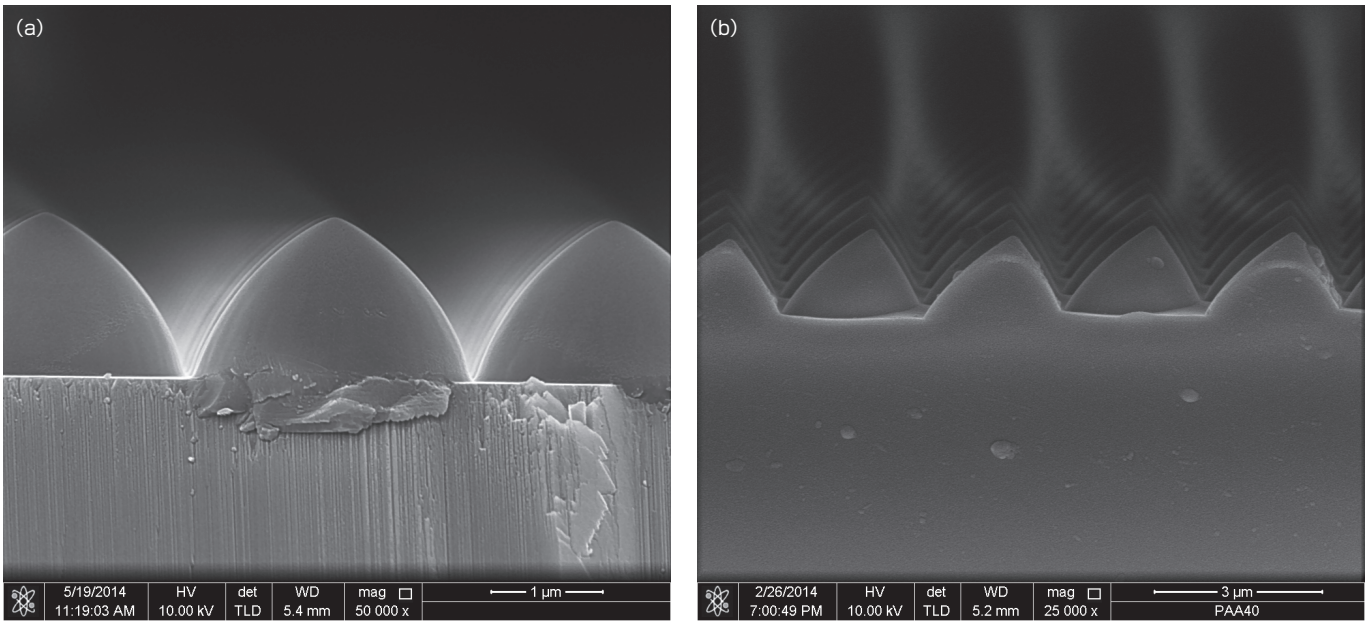

図3　構造的硬直性に優れたPRマスクを用いて乾式プラズマエッチングを施したPSSには均一性が見られるのに対し（a）、エッチング工程を通してPRマスクの構造的硬直性が維持されない場合の結果は芳しくない（b）。

面積に占めるパターン化領域の割合が大きいほど、エピタキシャル成長プロセスの横方向成分が増加し、貫通転位密度が低減することがわかっている。このことは、TEMによって視覚的に確認できるほか、X線ロッキングカーブ解析におけるFWHMの減少によっても確認することができる。

高さ対幅のアスペクト比が高い方が、エピタキシャル成長の横方向成分が促進される可能性を示唆する結果も報告されているが、こちらについてはさらなる研究が求められる。業界における最近のトレンドとしても、ピッチに対する幅を大きく、幅に対する高さを大きくする傾向が見られる。これは偶然の一致ではなく、上述の設計規則を考慮した結果である可能性がある。形状（円錐、半球、ピラミッドなど）とパターン密度も、横方向の成長に影響を与える設計パラメータである。

形状、アスペクト比、パターン密度は、LED設計者が光抽出を高めるための拡散効果について検討する際の主要項目である。しかし本誌では、パターン密度のみを取り上げて説明する。

パターン密度を制御するには、パターンの配列形状とパターン間隔を検討する必要がある。パターンは多様な形状に並べることができるが、一般的には五角形配列のみが配置形状として使用されている。パターンを最も高い密度で並べることができるためだ。ただし、パターンの周期間隔を小さくすれば、さらに配置密度を高くすることができる。ナノスケールのパターン化の効果については、多くの研究者によって広く研究が進められている。配置密度が大幅に高くなることによって光抽出効率が高まるだけでなく、エピタキシャル品質の向上によって内部量子効率も高くなる可能性がある。

多数の研究者によって、ナノパターン化基板上のLEDの発光効率が、従来の平らな基板だけでなくマイクロパターン化基板と比較しても著しく向上することが報告されている。これまで、ナノスケールのPSSはLED業界において採用されていなかった。ナノスケールのPSSには、それぞれに対して独自の高度なカスタマイズが必要になるからである。

ナノPSSは通常、インプリントまたは高分解能光リソグラフィによってナノスケールパターンのフォトレジストをサファイア基板上に塗布し、続いてICPエッチングを施すことによって作製する。ナノPSS用の高分解能光リソグラフィを適用するには、基板表面の平坦性が非常に高くなければならない。それは、現行のサファイア基板供給メーカーにとってかなり難しい課題である。業界内では、本誌で説明したPSSの各設計要素がLED性能に与える影響について、ある程度の意見の一致が得られつつある。しかし、LEDチップメーカーは専有する機密情報を社外に公表することには消極的であるため、その一致の範囲は限定されている。

主要なプロセスパラメータ

本誌では、LED性能という観点から

PSSプロファイルのさまざまな設計パラメータについて説明してきた。最も重要な特性としては、高さ、幅、ピッチ（パターン形状の周期間隔）、形状がある。また、ウエハの端から端まで全体と、異なるウエハ間において、これらのパラメータが均一であることが、LEDチップ製造の効率化と、無駄のない作業工程の実現に向けて非常に重要となる。

周期的なパターン構造をサファイア基板に形成する処理は、パターン化されたPRマスクをサファイア基板上に配置し、ICP RIEによって行う。正確で均一な高精度の構造をPRマスクに作製することが、有効なPSSを正しく作製するための最初のステップである。これと同等に重要になるのが、その後のICP RIE工程全体を通して、高精度なパターンが作製されたこのPRマスクの構造的完全性を維持することである。この構造的硬直性は、ICP RIEシステムにおけるレジストの硬化と基板の冷却によって得ることができる。**図3**は、エッチング工程においてレジストの構造的完全性と精度が適切に維持されない場合に、PSSの最終的な品質にどれだけ深刻な影響が生じるかを示している。

ICP RIE工程において、PSSプロファイル特性に大きな影響を与えるその他の主な検討項目としては、PRマスクに対するサファイアエッチングの選択性、バイアスRF電力、ICPプロセス圧力、プラズマ均一性を実現するRFコイル設計、プラズマ化学物質、基板温度制御がある。ターゲット用途に対して最も効果的なPSSを実現できるかどうかは、これらすべてのパラメータをどれだけインテリジェントかつ慎重に、組み合わせて実現できるかにかかっている。**図4**は、これらのパラメータの組み合わせ方法によって、形成されるパターンにどれだけ大きな違いが生じ得るかを示している。

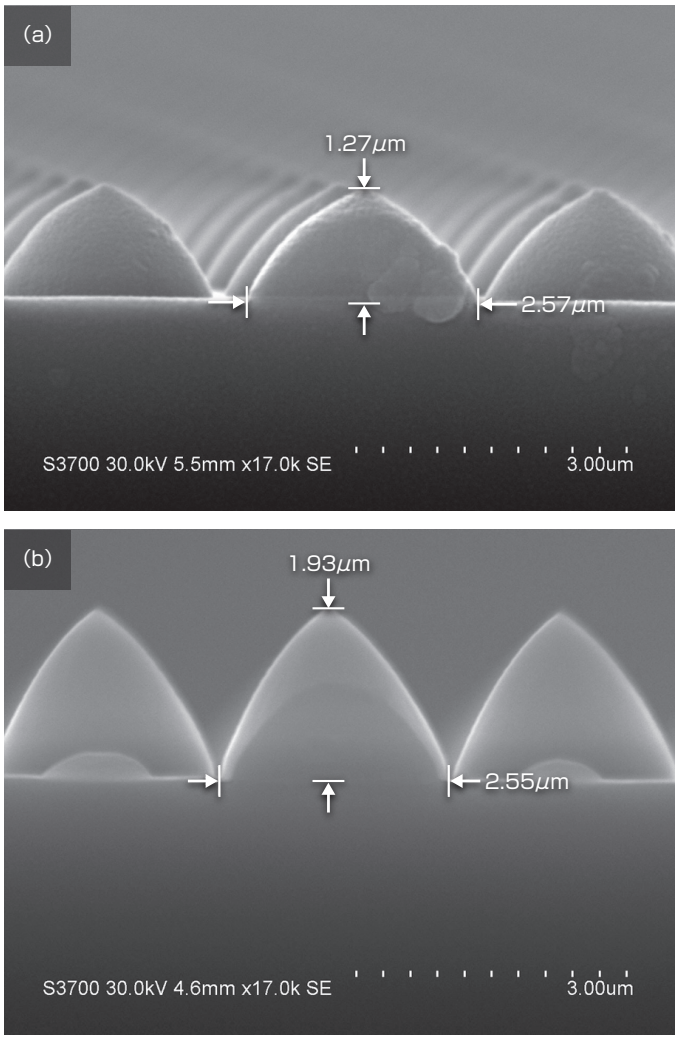

図4　さまざまなPSS構造が存在する。例として、（a）に高さ1.3μm、幅2.5μm、（b）に高さ1.9μm、幅2.6μmの形状を持つウエハを示す。

PSS市場の今日のトレンド

これまで、PSS業界を牽引するのは主にLEDチップメーカーだった。LEDチップメーカーは、PSSを社内で作製するか、または契約メーカーに外注している。この状態に変化に生じ始めており、同業界の支配力がLEDチップメーカーからサファイア基板メーカーへと移行しつつある。

サファイアウエハメーカーは現在、LEDチップメーカーとの提携によってサファイアウエハ上のパターン形成に取り組み始めている。しかし、ほとんどのサファイアメーカーが、2～4インチの範囲の小口径基板のパターン化のみを対象としている。6インチの製品を発表し始めている企業はほんの少数である。ルビコン社は2013年に、直径4、6、8インチの大口径PSS製品提供を開始した。優れた品質管理と、業界最高水準の垂直統合アプローチによって、他社とは一線を画す製品になっている。

著者紹介
ドングン・コ（DONGGEUN KO）は、米ルビコン・テクノロジー社（Rubicon Technology）のテクノロジー担当副社長、ヤコブ・ユーン（JACOB YOON）は同開発マネージャー、ジャンホ・ソ（JANGHO SEO）は同シニア開発エンジニア。

LEDJ