インライン監視とSPCによるLED製造の改善

スティーブン・チェン

LEDウエハ上の欠陥に対するインライン監視によって、メーカーはどの欠陥が歩留まりに影響を与えるかを理解し、歩留まり改善に向けた継続的な取り組みにその情報を適用することができる。

LED製造は大規模な変革の只中にある。高輝度LED、大型ウエハサイズ、新しい複雑なアーキテクチャへの進化によって、LED製造はかつてないほど難しくなっている。これらの動きは、LEDの効率と性能面においてSSL（Solid State Lighting：固体照明）業界に著しい進歩をもたらすが、歩留まりに悪影響を与える可能性も秘めている。目まぐるしく変化するこの環境の中でLEDメーカーが競争力を維持するには、包括的なインライン工程管理手法によって、歩留まりを改善し、LEDとSSL最終製品のコストを引き下げる必要がある。

ほとんどのLEDメーカーが現在、検査ツールを使用してウエハを分析し、DOI（Defect of Interest）を記録している。欠陥密度が通常、統計的工程管理（SPC：Statistical Process Control）の測定基準として用いられる。しかし、この方法の欠点は、歩留まり損失を引き起こさないニュイサンス欠陥（Nuisance Defect）が多数含まれている可能性があるという事実である。検査ツールで欠陥のあるウエハを検査する際に、どれが歩留まりや電気的性能に影響を与える致命的欠陥（Killer Defect）で、どれが単なるニュイサンス欠陥であるかをどのようにして判断すればよいのだろうか。メーカーは、有機金属気相成長（MOCVD：Metal Organic Chemical Vapor Deposition）装置内の反復的なエピタキシャル成長によるウエハ製造において、できるだけ早い段階で致命的欠陥を検出する必要がある。メーカーが徐々にMOCVD工程を最適化して、致命的欠陥を低減することができれば理想的だが、製造ラインに対する何らかの監視を行わない場合には、エクスカーション（Excursion）と呼ばれる状態が引き起こされたり、製造工程の一部の停止や改造が必要になったりする可能性がある。

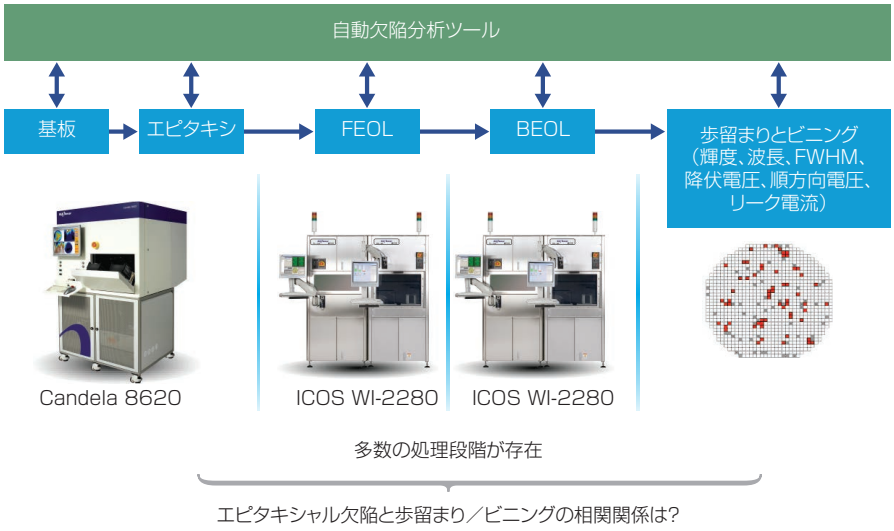

図1　インライン監視は、LED製造工程の複数の処理段階全体にわたって適用する必要がある。

欠陥が歩留まりにどのような影響を与えるかを判断するにはインライン監視が不可欠であり、適切な戦略があれば莫大なROI（Return On Investment：投資回収率）が達成できることが、既に知られている。加えて、総欠陥密度を使用する現行の方法は実用的ではない。そこで本稿では、歩留まりに影響を与える欠陥を特定し、欠陥と歩留まりの関係を明らかにするための体系的な手法を紹介する。

LED製造工程

高度な工程管理手法の詳しい説明に入る前に、まずはその前準備として、LED製造工程の流れを確認しておきたいと思う。このプロセスフローを理解することによって、重要な検査ポイントがどこで発生するか、また、工程管理によってどうすれば是正措置までの時間を短縮できるかを理解することができる。それがROIの向上につながる。LED製造プロセスフローを簡略化したもの

を**図1**に示す。LED製造工程は一般的に、4つの基本的な段階で構成される。つまり、基板、エピタキシ、FEOL(front end of line:製造ラインのフロントエンド)、BEOL(back end of line:製造ラインのバックエンド)の4つで、その後に最後のアセンブリ工程が続く。

まず、LED製造に主に使用される基板材料は、サファイア、ガリウム、ヒ素、炭化ケイ素(SiC)である。窒化ガリウムやシリコンといった代替基板を利用する試みも進められている。どの基板を使用する場合でも、IC(Integrated Circuit:集積回路)業界の半導体プロセスと同様に結晶ブールが作製される。ブールは通常、ダイヤモンドソーによって非常に薄いウエハにスライスされ、スライス後に厳格な処理によって研磨されてからLEDメーカーに出荷され、そこでさらなる加工を施される。

エピタキシと呼ばれる次の段階では、ウエハ表面上に半導体結晶のさらなる層を成長させる。MOCVDは、量子井戸を間に挟んだp層とn層のエピタキシャル成長のための一般的な方法である。p層とn層を合わせた厚さは通常、およそ数ミクロンである。MOCVDの前に検査ポイントを設けることが重要である。供給される基板の品質が低いと、それがその後の電気的プローブ試験の段階で、順方向電圧や逆方向リーク電流の仕様を満たさないなど、不合格の原因になる恐れがあるためだ。

また、基板とエピタキシャルの段階で発生した欠陥は、デバイスの性能、信頼性、歩留まりに影響を与える可能性がある。「Candela 8620」などの装置は、基板とエピタキシの段階において、パターニング前のウエハを検査することができる。これらの初期の段階で欠陥を検出することが、根本原因特定までの時間の短縮と、MOCVD装置の稼働時間と歩留まりの改善につながる。さらにこのウエハ検査システムは、欠陥を正しく検出できるだけでなく、欠陥を正確に分類することができる。これは、インライン工程監視とSPC管理のための重要な情報となる。

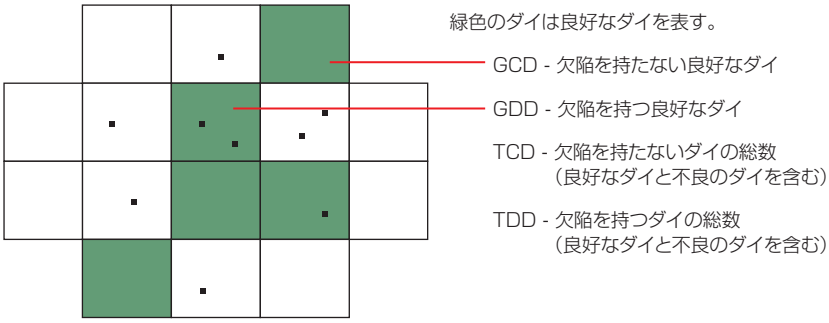

図2　監視ツールは、欠陥を識別し、歩留まりと相互に関連付けることができる。

フロントエンド処理

エピタキシャル成長に続く工程はFEOLである。LED製造工程におけるFEOLは、半導体プロセスに似ているがそれよりも工程数が少なく、BEOLの前のウエハの洗浄、リソグラフィ、エッチング、メタライゼーション、蒸着、アニールが行われる。光抽出を高めるためのパターニングもFEOLで行われる。

ここで、同時に製造工程を流れる任意のウエハセットにおいて、良好なダイにも不良のダイにも同じだけのコストがかかることを認識しておく必要がある。不良のダイにもLED製造の全工程の処理を施す必要があるためである。したがって、製造ラインが開始した後の早い段階での欠陥の検出/是正は、将来の製造コストを削減するための鍵を握る。

LED構造がさらに複雑になるにつれ、欠陥を分類(ビニング)して欠陥の位置を把握する能力がますます重要になり、FEOL工程全体にわたる検査が必要になる。同じ欠陥であっても異なるLED構造上にあれば、歩留まりや電気的性能に与える影響は異なる。また、位置によって、どのような属性を持つ欠陥が他の欠陥よりも重要度が高く、歩留まりとの関連性が高いかは異なる。

分析と工程管理のための良好なデータセットをメーカーが確実に収集するためには、高い欠陥検出感度と正確な分類能力を持つ検査装置が必要である。

表1　理論的なウエハセットに対する歩留まりデータ

ウエハID	歩留まり(%)
ウエハ1	60
ウエハ2	70
ウエハ3	80
ウエハ4	90
ウエハ5	60
ウエハ6	70
ウエハ7	80
ウエハ8	90
ウエハ9	75
ウエハ10	80
ウエハ11	90
ウエハ12	80
ウエハ13	60
ウエハ14	70
ウエハ15	90
ウエハ16	80
ウエハ17	80
ウエハ18	70
ウエハ19	80
ウエハ20	70
平均	76.25

「WI-2280」のようなウエハ検査装置は、リソグラフィ、エッチング、メタライゼーションなどのさまざまな処理段階において、すべてのパターニング済みウエハを検査することができる。さらにWI-2280は、欠陥検出率が高く、独自の欠陥分類機能を持ち、工程管理と詳細な評価のための高度な分析ソフトウェアと密接に統合することのできる高度なレシピ調整エンジンを搭載する。

バックエンド処理

FEOL工程を終えたウエハは、BEOL工程へと進み、最後のアセンブリの前のシンギュレーション、試験、仕分けが行われる。ダイシング前後のシンギュレーション検査は、工程管理の実現と歩留まりの改善に不可欠である。シンギュレーション後には、シンギュレーション装置によってウエハが損傷していないことを確認するために、欠陥を検査する必要がある。例えば、ダイ上に擦過傷や異物があると、試験中にダイにひびが入る恐れがある。WI-2280はBEOL検査にも利用され、歩留まりに関連する欠陥を検出する。

ダイのシンギュレーションの後には、ダイの接着とワイヤボンディングが行われてから、カプセル化と最後のアセンブリが行われる。パッケージLEDの検査では、アセンブリ欠陥の検査が行われる。梱包して出荷する前のこの工程では、ダイの欠損、ワイヤボンディングの欠陥や位置ずれなどが生じる可能性がある。

最後に、これらの検査結果をまとめて工程管理を行うことが重要である。検査装置の欠陥検出感度と分類能力に合致した歩留まり管理ソフトウェアによって、すべてのデータを統合しなければならない。ソフトウェアは、さまざまな検査ポイントで得られた検査データを取り込み、分析と監視を行う必要がある。次のセクションでは、インライン監視の導入例を紹介し、データを統合して有意義な分析と結果を得る方法を示す。

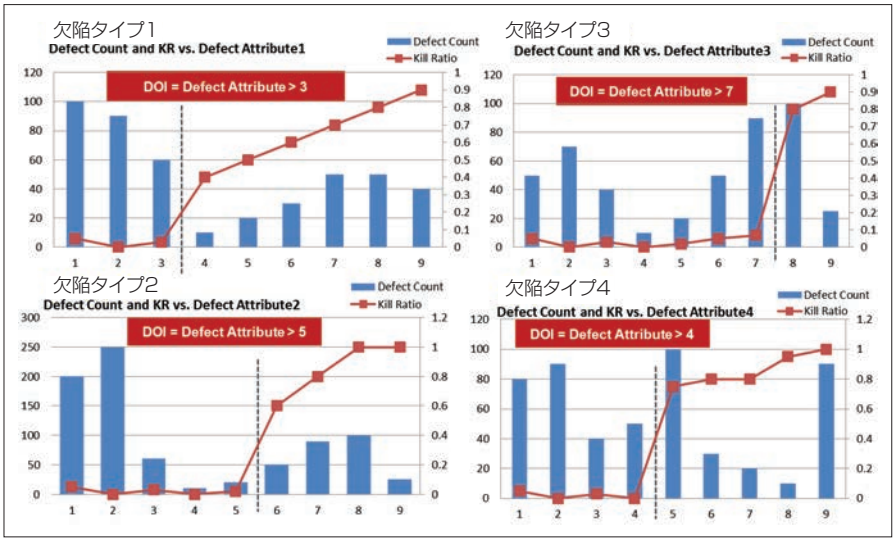

図3　致命率調査は、複数の種類の欠陥に対して実施することができる。

表2　歩留まりに影響を与えるDOIの定義

DOI	影響の小さいDOIのビン	歩留まりに影響を与えるDOIのビン
欠陥タイプ1	欠陥属性≦3	欠陥属性＞3
欠陥タイプ2	欠陥属性≦5	欠陥属性＞5
欠陥タイプ3	欠陥属性≦7	欠陥属性＞7
欠陥タイプ4	欠陥属性≦4	欠陥属性＞4

手法の概要

既に述べたように、すべての欠陥が最終的な歩留まりに影響を与えるわけではないため、歩留まりに影響を与える欠陥とニュイサンス欠陥を区別することが重要である。そこで、エピタキシャル欠陥と、それが歩留まりに与える影響の間の関係を理解し、歩留まりに影響を与えるDOIをニュイサンス欠陥と区別するための体系的な手法を構築する必要がある。適切な工程管理ループを確立するには、図1に示すような高度な欠陥管理装置がなくてはならない。基板、エピタキシ、FEOL、BEOLの各工程で検出された欠陥情報は、自動欠陥分析ツールへと入力することができる。本稿の例では、エピタキシャル欠陥密度と歩留まりとの間に相関関係が存在するかどうかに着目したいと思う。

歩留まりに影響を与えるDOIをニュイサンス欠陥と区別するための方法の1つに、致命率（KR：Kill Ratio）分析と呼ばれるものを使用する方法がある。致命率とは、ダイの損失につながると推測される欠陥の比率を表す。致命率は、それまでに実施した製造工程を通して収集されたデータから導き出され、現在の検査で検出された欠陥のうち、製造工程の最後でダイの損失を引き起こすものの数を算出するために使用さ

ウエハID	影響の小さい欠陥	歩留まりに影響を与える欠陥	欠陥総数	歩留まり(%)
ウエハ1	60	1300	1360	60
ウエハ2	710	1000	1710	70
ウエハ3	1050	480	1530	80
ウエハ4	930	60	990	90
ウエハ5	60	1140	1200	60
ウエハ6	120	950	1070	70
ウエハ7	550	450	1000	80
ウエハ8	1100	30	1130	90
ウエハ9	750	560	1310	75
ウエハ10	730	405	1135	80
ウエハ11	1110	25	1135	90
ウエハ12	620	360	980	80
ウエハ13	70	1080	1150	60
ウエハ14	140	890	1030	70
ウエハ15	1650	75	1725	90
ウエハ16	1000	275	1275	80
ウエハ17	1100	230	1330	80
ウエハ18	170	760	930	70
ウエハ19	400	140	540	80
ウエハ20	700	580	1280	70

欠陥総数

UCL	UCLを超えるサンプルの数	歩留まり(%)
1600	2	76.25 + 3.75
1400	3	76.25 + 3.75
1200	8	76.25 - 0.62
1000	15	76.25 - 1.25
800	19	76.25 - 0.20
600	19	76.25 - 0.20
400	20	76.25 - 0.00
200	20	76.25 - 0.00
Example: UCL = 1400		

歩留まりに影響を与える欠陥

UCL	UCLを超えるサンプルの数	歩留まり(%)
1000	3	76.25 - 16.25
900	5	76.25 - 12.25
800	6	76.25 - 11.25
700	7	76.25 - 10.54
600	8	76.25 - 10.00
500	9	76.25 - 9.03
400	12	76.25 - 5.83
300	13	76.25 - 5.10
200	15	76.25 - 3.92
100	16	76.25 - 3.44
Example: UCL = 1000		

図4　これらの表は、歩留まりに影響を与える欠陥の数と欠陥総数を比較して示すとともに、管理限界の設定例を示している。

れる。

致命率が、歩留まりに影響を与えるDOIとニュイサンス欠陥との区別にどのように役立つかを理解するにはまず、致命率モデルの用語を理解する必要がある。**図2**は、この概念を示したものである。ビンデータは、ビンコードで識別された良好な(good)ダイと不良の(bad)ダイを表す。加えて欠陥データでは、欠陥を持たない(clean)ダイと欠陥を持つ(dirty)ダイが識別される。欠陥を持たないダイは、検査工程で検出された欠陥(adder defect、パーティクルなど)を含まず、欠陥を持つダイは、検査工程で検出された欠陥を含む。図2において、各正方形はダイを表し、点は欠陥を表す。緑色の正方形は良好なダイを表し、白は不良のダイを表す。したがって、GCD(Good clean die)は、欠陥を持たない良好なダイのことで、GDD(Good dirty die)は、欠陥を持つ良好なダイのことである。さらに、TCD(Total clean die:欠陥を持たないダイの総数)とTDD(Total dirty die:欠陥を持つダイの総数)がある。

以下は、歩留まりと致命率の公式である。

歩留まりの式：

$$Y_{\text{Dirty Die}} = Y_{\text{Clean Die}} \times Y_{\text{Particles}}$$

$$\frac{(GDD)}{(TDD)} = \frac{(GCD)}{(TCD)} \times (1\text{-}KR)$$

致命率の式：

$$KR = 1 - \frac{(GDD \times TCD)}{(GCD \times TDD)}$$

予測されるダイ損失：

dirty die × kill ratio

一般的には、歩留まりは単純に、良好なダイの数をダイ総数で割ることによって算出される。しかし、本稿では、少なくとも1つのDOIを持つダイのみに着目して、それによる歩留まりへの影響を導き出すことを目的としているため、上記のような公式を使用する。実際の製造工程においてメーカーは、異なる種類の欠陥に対してこのような分析を行う。欠陥のサイズや位置などの欠陥属性を、致命率算出結果によってビニングすることで初めて、歩留まりとの相関関係を確認することができる。つまり、致命率が高い欠陥ほど、歩留まりに大きな悪影響を与える。

データを収集した後には、検査ツールから正確なビン仕分けデータ、ウエハのリスト、歩留まり情報、欠陥タイプを取得する必要がある。続いて、米

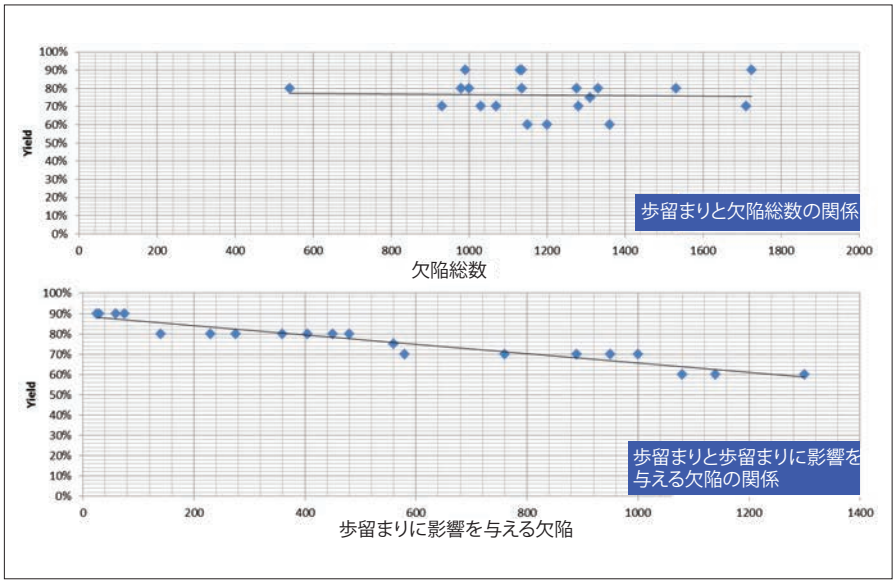

図5　歩留まりに影響を与える欠陥の増加に伴って、歩留まりが低下する様子を示す相関グラフ

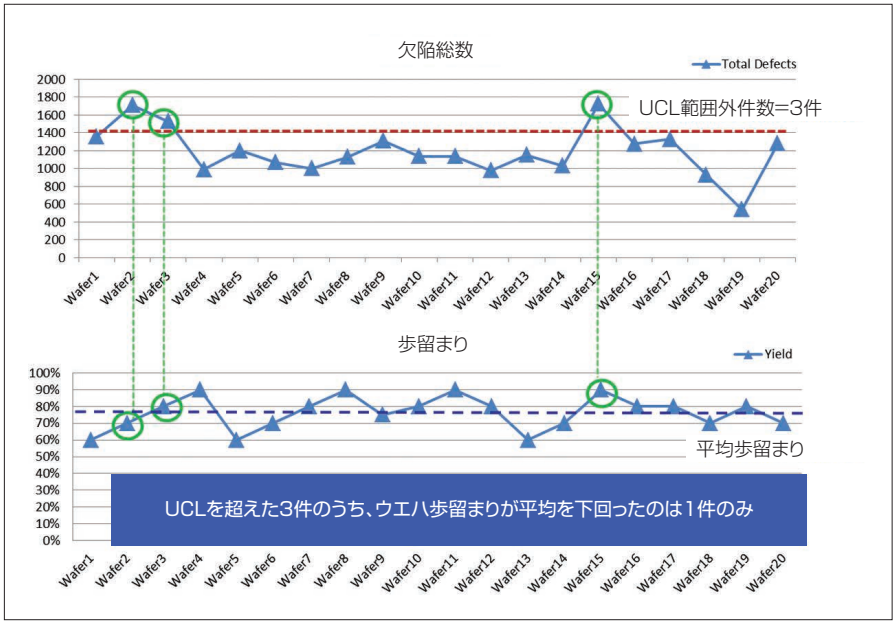

図6　欠陥総数に基づいて設定されたSPC監視は、歩留まりへの影響との相関関係を持たない。

KLAテンコール社（KLA-Tencor）の「Klarity LED」のような歩留まり管理ソフトウェアツールを使用して、分析を行う。ここで、欠陥マップとビン仕分けマップを必ず正確に対応付ける必要がある。ウエハの正確な分類／対応付けは、致命率分析の基本であり、非常に重要な作業である。この致命率情報から、歩留まりに影響を与えるDOIの定義を導き出すことができる。DOI定義が得られれば、それをすべてのウエハに適用することができる。致命率分析を終えたら、欠陥数を最終的なビン歩留まりに相互に関連付けることによって、歩留まりに影響を与える欠陥を特定することができる。最後に、傾向グラフも得られ、上方管理限界とSPC管理を設定することができる。この分析作業は、歩留まりに影響を与えるDOIの定義が満たされるまで繰り返される。

例と実験結果

表1は、理論的な歩留まり調査と相関関係の結果の例で、本稿の高度な欠陥識別手法を表すものである。この例では、それぞれ歩留まり情報を持つ20枚のウエハがあり、歩留まりの平均または基準は76%となっている。レイヤ、クラス、サイズ、ウエハゾーン、ダイ内領域、シグネチャ種別など、分析対象とすることのできる欠陥属性は、多数存在する。この例では、欠陥サイズを対象属性とし、Klarity LEDを使用して、歩留まりに影響を与える欠陥と欠陥サイズの相関関係を調査した。

図3は、4つの異なる理論的欠陥タイプに対して、歩留まりに影響を与える欠陥属性を特定する方法を示したものである。特定の欠陥タイプに対し、欠陥数と致命率をその欠陥サイズごとにグラフ化している。致命率が急激に増加する箇所に、しきい値ラインが点線で描画される。欠陥タイプ1の場合は、欠陥サイズが3を超える箇所で致命率が急激に増加しており、そこがしきい値となる。欠陥タイプ2、3、4に対しても同じ実験が行われている。基本的に、欠陥サイズによるビニングは、致命率のしきい値をベースとする。必要に応じて任意の数のセグメントを設けて、任意の欠陥サイズの組み合わせによる歩留まりへの影響を調べることができる。

すべての欠陥タイプに対して致命率分析を行った後の、歩留まりに影響を与えるDOIの最終的な定義を**表2**に示

す。ビン1は、影響の小さいDOIのビンで、ビン2は、致命的欠陥を含む、歩留まりに影響を与えるDOIのビンである。

分析の次の段階では、歩留まりに影響を与えるDOIの定義を、分析対象の各ウエハに適用する。最後に、歩留まりに影響を与えるすべての欠陥を集計して、最終的な歩留まりとどの程度の相関関係があるかを調べる必要がある。**図4**には、20枚のウエハに対する、歩留まりに影響を与える欠陥の数と、欠陥総数が示されている。

欠陥総数は、歩留まりとの相関関係がそれほど高くないことが見てとれる。例えば、上方管理限界線(UCL:Upper Control Limit)を欠陥総数1400個に設定した場合、1400個を超える欠陥を含むウエハは3枚存在する。これらは、最も多くの欠陥を含むウエハである。しかし、それらの歩留まりは、基準とする平均歩留まり76.25%よりも高い。明らかに、それらの欠陥の多くが歩留まり損失につながっていないことがわかる。

一方、UCLを歩留まりに影響を与える欠陥1000個に設定した場合も、3枚のウエハがその限界を超える。興味深いことに、これらのウエハの歩留まりは、平均歩留まりよりも16.25%低い。したがって、歩留まりに影響を与える欠陥を多く含み、かつ、歩留まりが高いウエハは存在しない。これは、この手法の正当性をさらに確信させるものである。

図5は、これらの20枚のウエハを用いて作成した2つの相関グラフである。上のグラフは、歩留まりと欠陥総数の関係を表し、下のグラフは、歩留まりと歩留まりに影響を与える欠陥の数の関係を表す。下のグラフの方が意味のあるグラフとなっている。歩留まりに影響を与える欠陥の増加に伴って、歩留まりが低下する様子が示されているためである。この結果に基づき、歩留まりに影響を与える欠陥に対するSPC管理を確立することができる。

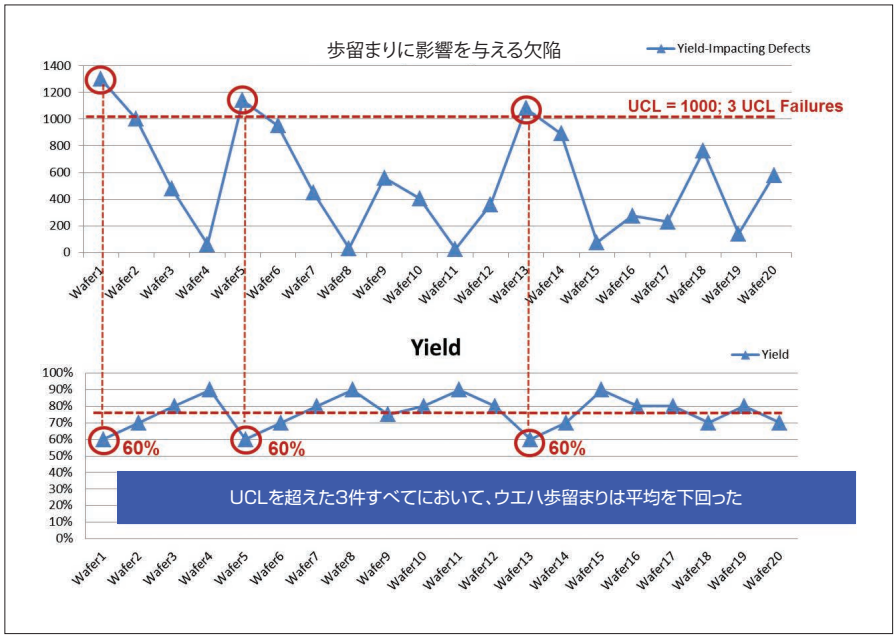

図7　歩留まりに影響を与える欠陥に基づいて設定されたSPC監視は、最低歩留まりのウエハと相関関係を持つ。

図6では、欠陥総数が多いウエハが、歩留まりの低いウエハではないことが見てとれる。UCLを欠陥総数1400個に設定した場合、UCLを超える3枚のウエハのうち、平均歩留まりを下回ったのは1枚だけである。つまり、欠陥総数と歩留まりとの間に相関関係はない。したがって、欠陥総数に基づいてSPCを設定すると、誤った方向へと進んでしまうことになる。

一方、**図7**は、歩留まりに影響を与える欠陥が多いと、ウエハの歩留まりが低下することを示している。UCLを歩留まりに影響を与える欠陥1000個に設定したこの例では、UCLを超えるすべてのウエハが、平均歩留まりを下回っている。したがって、SPC管理を確立することができる。

インライン監視はLED製造工程において不可欠であり、歩留まりに影響を与える欠陥をニュイサンス欠陥と区別するための手法が必要であることは周知のとおりである。致命率は、欠陥サイズなどの欠陥属性との相関関係があるため、致命率分析によって、欠陥属性ビニングを設定して、歩留まりに影響を与える欠陥を特定するための重要な情報を得ることができる。さらに、本稿で示した、欠陥と歩留まりを関連付ける手法によって、LEDメーカーは、歩留まりに関連する欠陥を体系的に把握することができる。それに基づくSPCを導入することで、コストのかかるエクスカーションを回避し、最適なROIを実現することができる。

著者紹介
スティーブン・チェン(STEVEN CHEN)は、米KLAテンコール社(KLA-Tencor Corporation)の工程管理ソリューションズ・テクノロジスト。

LEDJ