ASIC製造ラインにおける欠陥検査法に関する基礎的研究

(第2報: 検査方法による歩留りとクリーニング頻度の変化)

正員 櫻井 光一* 非会員 藤井 進**

正員 貝原 俊也**

A Basic Study on Defect Inspection Method for ASIC Manufacturing Line

(Second Report: Inspection Parameter Dependence on Yield and Cleaning Cycle)

Koichi Sakurai*, Member, Susumu Fujii**, Non-member, Toshiya Kaihara**, Member

The influence of strict defect control is both the enhancement of manufacturing yield and the delivery delay due to the drop of the machine operation rate. Therefore defect inspection method must be optimized for this trade-off especially for ASIC manufacturing. In the first report, we proposed a new cost model which treats not only inspection and yield model but also and workflow model. In this report, we formularize the inspection parameter dependance on manufacturing yield and machine cleaning cycle that may affect delivery time. With the formula, factory engineers can get practical information for inspection parameter optimization.

キーワード: ASIC, LSI, 生産技術, 物流, 歩留り, 欠陥検査

Keywords: ASIC, LSI, manufacturing technology, work flow, yield, defect inspection

1. はじめに

携帯電話やデジタルカメラ等のデジタル家電製品の普及に伴い、信号処理を行うシステム LSI 等の ASIC の需要が増加している。デジタル家電製品は数ヶ月サイクルで新製品が投入され、一ヶ月の納期遅延が莫大な経済的損失をもたらす。そのため ASIC 製造ラインには短工期に加えて納期厳守が求められる。そのため、工期短縮を目的とした物流面で報告が数多くなされている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。

LSI は、基本的には、成膜、レジスト塗布・パターン転写、エッチング、レジスト除去という工程を繰り返しながら立体配線構造を形成し、数百工程を経て製品となる。ところがそれらの工程の多くはやり直しのできない不可逆的なプロセスである。そのため品質管理の為に、途中工程で各種の品質検査を行って問題を早期に検知して対策し、

後続のウエハが被害を受けないようにフィードバックをかけることが必須となる。

製造過程でウエハに付着する異物等によって発生するパターン欠陥は、歩留りの重要管理項目のひとつであり、異物低減⁽⁶⁾や検査感度向上⁽⁷⁾等数多くの報告がなされている。異物発生の主原因としては製造装置からの発塵やプロセス副生成物が挙げられる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。プロセス副生成物の一部は装置内に残留して後続処理されるウエハに異物として付着することがある。そのため異物数を抑制するために随時クリーニングを行って装置内を初期化する対策が行われている⁽⁶⁾。

しかし一方でクリーニング頻度の増加は、ロットの待ち時間を含む装置がロット処理を可能な時間の減少を招き装置稼働率を低下させる。従って、欠陥検査による装置管理を厳しくした場合、クリーニング頻度の増加に伴う歩留りの上昇(スループットの向上)と装置稼働率の低下(スループットの低下)が同時に引き起こされてしまうため、状況に応じた適切な頻度で装置クリーニングが行われるように欠陥検査による管理を行うことが必要となる。このように ASIC 製造においては、コスト/生産量/納期といった様々な優先課題や、装置異物の発生状況に合わせた欠陥検査を行うことが重要である。

半導体製造ラインの欠陥検査ウエハサンプリング手法に

*三菱電機(株)ULSI技術開発センター

〒664-8641 兵庫県伊丹市瑞原4丁目1番地

ULSI Development Center, Mitsubishi Electric Corporation
4-1, Mizuhara, Itami, Hyogo 664-8641, Japan

**神戸大学工学部情報知能工学科

〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1

Department of Compute & Systems Engineering, Kobe
University

1-1, Rokko-dai, Nada-ku, Kobe 657-8501, Japan

関しては R.K. Nurani らの研究⁽¹⁰⁾が有名であり、検査間隔と異常ロット見逃しリスク等をコスト換算して最適検査手法の設定法を提案したのに加え、“Adaptive Sampling”等の興味深い報告⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を残している。しかし彼等のモデルは、(1) 実状に適用するには異物発生の時系列モデルが単純である、(2) 物流情報や納期遅延がコスト計算に盛り込まれていない、等の点で、システム LSI をはじめとした ASIC 製造ラインの検査最適化に適用する上で課題がある。

この課題に関し、第一報⁽¹³⁾では、欠陥管理と装置稼働率を統合させた生産性評価モデルを提案し、物流シミュレータを用いた数値実験による特性解析を行った。具体的には、あるプロセス装置の実測データを基に、欠陥数の発生確率を対数正規分布で近似し、検査パラメータ・欠陥発生状況・物流状況に応じて、所定のチップ数を生産するための所要時間がどのように変化するかを検討した。その結果、(1) 欠陥発生状況に加え稼働率と歩留りのバランスで検査間隔や欠陥割合の許容限界に最適値が存在する、(2) 負荷率や仕掛け数によって最短所要時間やその最適管理限界値が大きく変化する、等の事を明らかにした。

本研究の最終目的は、歩留りや納期遅れによるペナルティ等を考慮に入れた製品のコストモデルを構築し、ASIC 製造ラインの欠陥検査最適化手法を提案することにある。

本論文ではその第二段階として、コストの検討に必要な、欠陥検査の運用法によって歩留りやプロセス装置のクリーニング頻度(稼働率)がどのように変化するかのかの定式化を行う。そして検査パラメータや欠陥状態等によってそれらがどのように変化するかについて論じる。

2. 生産モデル

本章では、検討対象とする生産モデルの、生産フローと不良率と検査モデルについて説明する。

〈2・1〉生産フロー 図1に本論文で想定する生産フローの概略説明図を示す。図1中、実線の矢印はロットの流れ(物流)を示し、点線は情報の流れを示す。ロットが前工程から投入され、ロットストックに入る。ロットストックからは、処理可能なプロセス装置に送られる。処理され

図1 検討対象とする生産フロー

Fig. 1. Schematic view of the manufacturing flow for analysis.

たロットは、所定の抜き取り検査間隔で欠陥検査が行われる。検査を省略されたロットおよび検査終了後のロットは、後続工程に送られる。

欠陥検査においては、検査間隔 N を『 N ロットに1ロットの確率で検査を行う』と定義する。その際、欠陥が検出されたチップの割合 x と、欠陥がないにもかかわらず存在すると誤検出されたチップの割合 y の合計が、ある許容限界値 S を超えた場合に『許容限界外』と判定し、当該プロセス装置のクリーニングを実施する。本論文で $y(\geq 0)$ を導入した理由は、理想的には $y = 0$ であるべきであるが、ウエハ表面の形状不安定性や感度不足等の影響で、現実にはある程度の誤検出が避けられない場合も少なくない⁽⁷⁾⁽¹⁵⁾からである。

また、許容限界外ロットが検出されなくても、プロセス装置に対しては所定のロット数を処理後に定期クリーニングを行う。本論文ではクリーニング間隔を L_{end} ロットと定義し、 L_{end} を 200 ロットと置く。

〈2・2〉不良率と検査モデル 前述のように異物発生の主原因は、製造装置からの発塵やプロセス副生成物である。従って、基本的にはクリーニング後から異物数は徐々に増加する。図2は、第一報⁽¹³⁾で紹介した実態調査における成膜工程での欠陥検出チップ数推移の実測例である。この場合は、誤検出がほぼ0である事を欠陥検出箇所の観察により確認している。図2では、クリーニング後の処理ロット数 L が 100 ロットを越えると、突発的な欠陥発生の確率が増加する傾向がある。また、50 ロット以前でも数回の突発的な欠陥発生が認められる。

本論文では、第一報⁽¹³⁾と同様に、欠陥発生の状態を2段階に分け、処理ロット数 L がある数 L_{th} を越えると状態が変化するものとし、 L_{th} 前後での欠陥検出チップの確率関数を別個に $f_i(x)$ とおいた。添字の i は、 $i = 1$ の場合は L_{th} 以前を、 $i = 2$ の場合は L_{th} 以降を示す。これはロット処理を重ねるにつれてプロセス装置内壁に残留物が堆積して、 L_{th} ロットである一定の厚みに達し、剥がれ現象⁽⁶⁾が起き易くなることを模擬している。本論文では L_{th} を 80 ロットとした。

図2 クリーニング後の欠陥検出チップ数推移の実測例

Fig. 2. Example of observed defect trend after machine cleaning.

電氣的不良チップの割合が、 x と比例関係（係数 α ）にあるものとする、平均不良率（期待値） D_i は (1) 式で表される。

$$D_i = \alpha \int_0^{\infty} x f_i(x) dx \dots\dots\dots (1)$$

外観検査で欠陥が検出されたチップの全てが電氣的な不良品になるとは限らない。例えば、回路パターンのないチップ部位に落下した異物は電氣的不良を起こしにくいからである。また逆に、全ての欠陥が検出されるとは限らない。従って α に普遍的な値はない。そこで本論文では $\alpha = 1$ と仮定した。

許容限界値 S に対して一回の検査で許容限界外が発生する確率は、 L_{th} 前後の場合を各々 $P_i(S)$ とすると (2) 式で表される。

$$P_i(S) = 1 - \int_0^S \left(1 - \int_{x-S}^{\infty} g(y) dy \right) f_i(x) dx \dots\dots\dots (2)$$

ここで $g(y)$ は、当該チップに欠陥がないにもかかわらず、検査装置が欠陥を誤検出してしまうチップの発生確率である。(2) 式中の $g(y)$ の積分項は x が S より小さいにもかかわらず y の加算によって許容限界外となる確率を示す。なおこの項は、 $x < S$ の場合は 0 とする。(2) 式の積分項全体は許容限界外が発生しない確率を示す。

m 回目の検査で許容限界外が発生する確率を $P_{1m}(S)$ 、 $P_{2m}(S)$ とおく。独立試行を仮定すれば、 L_{th} ロットのうちに許容限界外が発生する確率 $P_{Lth}(S, N)$ は、 $P_{1m}(S)$ を検査回数（ $= L_{th}/N$ ）積算すればよいので、(3) 式で表される。許容限界外判定までの平均検査回数 $M_{Lth}(S, N)$ は (4) 式となる。

$$P_{Lth}(S, N) = \sum_{m=1}^{L_{th}/N} P_{1m}(S) = \sum_{m=1}^{L_{th}/N} (1 - P_1(S))^{m-1} P_1(S) \dots\dots\dots (3)$$

$$M_{Lth}(S, N) = \sum_{m=1}^{L_{th}/N} m P_{1m}(S) \dots\dots\dots (4)$$

同様に L_{th} ロットから L_{end} （定期クリーニング間隔）まで許容限界外が発生する確率 $P_{end}(S, N)$ および平均検査回数 $M_{end}(S, N)$ は (5)、(6) 式で表される。

$$P_{end}(S, N) = \sum_{m=1}^{(L_{end}-L_{th})/N} P_{2m}(S) \dots\dots\dots (5)$$

$$M_{end}(S, N) = \sum_{m=1}^{(L_{end}-L_{th})/N} m P_{2m}(S) \dots\dots\dots (6)$$

(3)～(6) 式より、クリーニング後から許容限界外になるまで

の平均処理ロット数 $L_{avr}(S, N)$ は (7) 式で表される。(7) 式中、第一項は L_{th} 以前での許容限界外に対応する発生確率とその平均検査回数の積、第二項は L_{th} から 200 ロットまで、第三項は定期クリーニングまでのそれらに相当する。(7) 式と同様の考え方で、平均不良率 $D_{avr}(S, N)$ は (8) 式で表される。なお、(7) 式と (8) 式の右辺における N 、 L_{th} 、 L_{end} 以外の変数は S と N の関数であるが、表記が冗長になってしまうため、 (S, N) を省略した。

$$L_{avr}(S, N) = M_{Lth} N P_{Lth} + (L_{th} + M_{end} N)(1 - P_{Lth}) P_{end} + L_{end}(1 - P_{Lth})(1 - P_{end}) \dots\dots (7)$$

$$D_{avr}(S, N) = \left[D_1 M_{Lth} N P_{Lth} + D_2 (L_{th} + M_{end} N)(1 - P_{Lth}) P_{end} + \frac{(D_1 L_{Lth} + D_2 (L_{end} - L_{th}))(1 - P_{Lth})(1 - P_{end})}{L_{end}} \right] / L_{avr} \dots\dots\dots (8)$$

3. 欠陥検出チップの確率関数の近似

前章におけるモデルでは、欠陥検出チップの確率関数 $f_i(x)$ を入力すれば、平均処理ロット数 $L_{avr}(S, N)$ や平均不良率 $D_{avr}(S, N)$ が求まる。本論文では、 $f_i(x)$ に近似関数を代入する事によって、各種パラメータによって L_{avr} や D_{avr} がどのように変化するのか数値実験を行い、その特性解析を行う。

図 3 に、図 2 の x のトレンドを L_{th} 以前と以降に分け、各々に対して積算した x の発生確率ヒストグラムを示す。縦軸は $f_i(x)$ である。 L_{th} 以降のヒストグラムは以前のそ

図 3 対数正規分布による欠陥状態の近似例
Fig. 3. Example of an approximation of defect situation by logarithmic normal distribution function.

れと比較して裾をひいている（多発ロットが多い）事が判る。このような関数を模擬するには色々な関数が考えられるが、本論文では第一報⁽¹³⁾と同様に対数正規分布を近似関数に選んだ。その理由は、(1) σ を増大させると分布形状が裾をひく、(2)ガンマ分布等と比較してばらつきと平均(σ と μ)という感覚的に理解しやすい2つのパラメータで近似できる、(3)あくまで参考データではあるが図3の近似例を統計検定で用いられる適合度判定を行った結果は $\chi_0^2 = 0.80 < \chi^2(7, 0.05) = 14.1$ となり『95%の確率で従わないとはいえない』等である。対数正規分布が普遍的なものとは断定できないが、定性的な傾向を把握する上では問題ないと考ええる。

図3中の L_{th} 以前の近似折線は、 $f_1(x)$ を(9)式中で $\sigma_1 = 0.6$, $\mu_1 = -2.69$ と置いた場合である。 L_{th} 以降の

近似折線は同様

$$1 = \int_0^\infty f_i(x) dx \\ = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \text{Exp}\left(-\frac{(\ln(x) - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) dx \dots\dots (9)$$

の式を用い $\sigma_2 = 0.7$, $\mu_2 = -2.59$ として $f_2(x)$ を計算した。これをCase Aとおいた。

第一報⁽¹³⁾と同じく、 L_{th} 以降にやや増加する場合(Case B)、増加が顕著な場合(Case C)も検討した。表1に数値パラメータを示す。表1中の ΔD は、 $D_2 - D_1$ である。どのCaseも L_{end} までクリーニングを行わなかった場合の平均欠陥率を9%とした。

図4に擬似乱数を用いて発生させた x の数値例を示す。Case Aでは図2にあるような L_{th} 以前の散発的な突発欠陥発生が模擬できている。

4. 数値実験と考察

本章では、検査パラメータや、欠陥発生確率関数のパラメータ、誤検出等による L_{avr} , D_{avr} 等の変化を数値実験によって調査し、その特性解析を行う。〈4.1〉、〈4.2〉では、単純化を図るため誤検出はないものとし、 $g(y)$ を0とした。

〈4.1〉 検査パラメータによる影響

〈4.1.1〉 クリーニング間隔(装置稼働率)の変化 図5に、許容限界値 S に対する $L_{avr}(S, N)$ の変化を検査間

表1 対数正規分布近似時のパラメータ
Table 1. Parameters of logarithmic normal distribution function used for approximation.

	Before L_{th}		After L_{th}		ΔD
	μ_1	σ_1	μ_2	σ_2	
Case A	-2.69	0.60	-2.59	0.70	0.015
Case B	-2.87	0.50	-2.57	0.82	0.043
Case C	-3.18	0.30	-2.43	0.80	0.078

図4 表1の数値を代入した対数正規分布を用いた模擬欠陥トレンドの例

Fig. 4. Example of simulated defect trend by logarithmic normal distribution function with the parameter shown in table 1.

図5 許容限界値と平均クリーニング間隔

Fig. 5. Defect control limit dependence on average cleaning cycle.

隔 N をパラメータにして示す。

S を大きく設定することによって、許容限界外が発生しにくくなり、 L_{avr} が増大する事が確認できる。また、 N を大きくすると L_{avr} も増大する。 S が 0.03 以下では、許容限界外がすぐに発生し、 N による L_{avr} の差 (図中の Y 切片) は、ほぼ N ロットとなる。 S を大きくする (判定基準を緩くする) と、より多くのロットが許容限界内と判定されて次の検査まで処理が継続され、 N による L_{avr} の差は大きくなる。

L_{th} 前後での x の違いが顕著な Case C では、 $L_{avr} = L_{th} (= 80)$ ロット付近 (図中矢印) で変曲点が認められる。これは、 x の平均値が小さい L_{th} 前では S を大きくする事によってクリーニング間隔が延びる (L_{avr} が増大する) が、 S が L_{th} 付近でクリーニングが行われるような値、換言すれば x の平均値が増大してすぐに許容限界外が発生するような値になると、許容限界外がすぐに発生してしまい、 L_{avr} の増大傾向が緩やかになる事を示している。

〈4・1・2〉不良率の変化 図 6 に、 S を変化させた時の $D_{avr}(S, N)$ の変化を N をパラメータとして示す。各 Case とともに許容限界外を起こさないで定期クリーニングまで処理した時の D_{avr} は 9% である。

S を 0 にした時の不良率は D_1 となる。不良率が D_1 より増加する事は、 L_{th} 以降まで修理が継続される現象を示唆している。例えば、図 6 の Case C、 $N = 2$ での点の

S 座標 (約 0.06) は、図 5 における $L_{avr} = L_{th}$ の S 座標 (Case C、 $N = 2$ で約 0.11) より小さい。この原因は、 L_{avr} が平均クリーニング間隔であり、 $L_{avr} = L_{th}$ の場合にも L_{th} 以降まで修理が継続される可能性があり、不良率が D_1 以上になるからである。従って不良率の増加を最小値 ($= D_1$) に抑えるには、 S を $L_{avr} = L_{th}$ となる値より小さく設定する必要がある。

〈4・1・3〉クリーニング間隔と不良率の関係 1 章で述べた様に、クリーニング間隔を短縮すれば歩留りは向上するが装置稼働率は低下する。従って、製造ラインで両者を統括する立場の技術者は、 $L_{avr}(S, N)$ と $D_{avr}(S, N)$ の関係を把握しなければならない。図 7 に、今回の数値実験における両者の関係 ($L_{avr}-D_{avr}$ 曲線と呼ぶ) を図示した。具体的には、 S を変化させた時の $L_{avr}-D_{avr}$ 曲線を N をパラメータとして示す。参考のため、 S の例を一点鎖線に表示した。同じ S に対して N を増加させると、状態変化を見逃す確率が上昇して L_{avr}, D_{avr} 共に増加する。

D_{avr} の L_{avr} に対する変化は、 ΔD の小さい Case A では小さく、 ΔD の大きい Case C では大きい。Case A では、 N が $L_{avr}(S, N)$ と $D_{avr}(S, N)$ の関係に及ぼす影響は小さく、最適化の意味も殆どない。これは ΔD が小さい場合は検査の意義そのものが希薄になる筈であるという直感的推測と一致する。Case C や Case B では、 N による D_{avr} の差が発生し、 N が大きい程 D_{avr} が大きくなる傾

図 6 許容限界値と平均不良率

Fig. 6. Relation between defect control limit and mean of defected die rate.

図 7 平均クリーニング間隔と平均不良率

Fig. 7. Relation between average cleaning cycle and mean of defected die rate.

向がある。この原因は、処理ロット数の平均値 (L_{avr}) が同じ場合でも、 N が大きい場合は被害ロット (L_{th} 以降に処理が行われてしまうロット) の割合が高くなるためである。

Case C の場合は L_{th} 前後で、 $N = 2$ の時に顕著な変曲点 (図中矢印) が認められる。図 5 の L_{avr} の変曲点に対応している。見方を変えれば、『 $D_{avr} = D_1$ とはできないが、 D_{avr} の増加を 0.5% 程度に抑えながら L_{avr} を約 3 倍に伸ばせる』点である。Case C を例にとれば、検査装置の処理能力が許す限り N を小さくして $L_{avr} = L_{th}$ となる S ($N = 2$ の場合は約 0.11) を設定することが、現実解とされる可能性が高い。実際には、コストが最小になるように検査条件設定がなされるべきであるが、コスト試算は次報以降の課題である。

以上の数値実験結果をまとめると、(1) L_{th} 前後での x の違いが顕著な場合 L_{th} 付近で $L_{avr}(S, N)$ の S に対する変化に関する変曲点が発生する、(2) 不良率を D_1 に抑えるには S を $L_{avr} = L_{th}$ となる値より小さく設定する必要がある、(3) $L_{avr}(S, N)$ と $D_{avr}(S, N)$ の関係においては ΔD が N を検討する必要があるかのひとつの指標となり (1) の変曲点に起因する $L_{avr} = L_{th}$ 前後で変曲点が存在する場合がある、等の現象が明らかになった。これらの現象は、製造ライン運用上の検査条件設定に関する指針と

なる。

〈4・2〉 欠陥状態パラメータによる影響 前節では検査パラメータによる影響を調査したが、本節では、 σ や μ 等の欠陥状態パラメータによる影響を考察する。なお、本論文で σ と μ は対数正規分布のパラメータではあるが、あくまで欠陥チップ数の『ばらつき』と『平均』の指標として取り上げた。

図 8 は、前節の最後で検討した、 $L_{avr}-D_{avr}$ 曲線に対する欠陥状態の影響に関して数値実験を行った結果の例である。 $N = 2$ に固定した。図 8 上図は、 $f_1(x)$ におけるばらつきと平均 (σ_1 と μ_1) を変化させた例、図 8 下図は $f_2(x)$ におけるばらつきと平均 (σ_2 と μ_2) を変化させた例を示す。パラメータは Case B (図 8 中太線) を基準として変化させた。従って、例えば σ_1 を変化させた場合は、 μ_1, σ_2, μ_2 は表 1 中の Case B の値と同一である。各パラメータを変化させると N の検討に関する指標である ΔD が変化する。Case B の ΔD は約 4.3 であるが、ここでは ΔD が減少する場合 (= 3.8) と増加する場合 (= 4.8) を検討した。 ΔD を一定としているので、 $f_1(x)$ のパラメータを変化させると D_1 が変化し、図 8 上図中の Y 切片が変化する。 $f_2(x)$ の場合は D_2 が変化するので L_{th} の以降変化が主体になる。 $f_1(x)$ の μ_1 を変化させた場合 (図 8 上図中点線) の $L_{avr}-D_{avr}$ 曲線は、図中 Case B (同図太線) の曲線と似た形である。一方、 σ_1 を変化させた場合 (図 8 上図中実線) は変化の様子が異なる。

この原因を、図 8 中の $\Delta D = 4.8$ の場合の $S = 0.15$ の一点鎖線を例にとって説明する。Case B では約 46 である L_{avr} の値に着目すると、 μ_1 を変化させた時は約 54 であるのに対し、 σ_1 を変化させた場合は約 87 まで増大する事が判る。換言すれば、同じ S に対して μ_1 を変化させるより σ_1 を変化させた方が L_{avr} の変化が大きいの。一方、 μ_1 を変化させた時と σ_1 を変化させた時の D_{avr} の値に大きな差はない。

図 8 欠陥状態が平均不良率とクリーニング間隔の関係に及ぼす影響

Fig. 8. Defect condition influence on the relation between average cleaning cycle and mean of defective die rate.

図 9 σ_1 や μ_1 を変化させた場合の $f_1(x)$ の変化 (図 8 上図の $\Delta D = 3.8$ の線と同条件)

Fig. 9. Function shape change of $f_1(x)$ by the change of σ_1 and μ_1 (same condition with the $\Delta D = 3.8$ line in the upper drawing in Fig. 8).

$\Delta D = 3.8$ の場合の $S = 0.25$ の一点鎖線における L_{avr} の変化も、 μ_1 と σ_1 の変化の方向は逆であるが、 μ_1 を変化させるより σ_1 を変化させた方が L_{avr} の変化が大きい点と D_{avr} の値に大きな差がない点は同様である。

図9に、図8上図の $\Delta D = 3.8$ の条件での $f_1(x)$ を示す。参考の為に Case B もプロットした。 $f_1(x)$ の裾野の部分 ($x > 0.1$) に注目すると、 σ_1 を変化させた場合 (細実線) の方が μ_1 を変化させた場合 (細破線) より $f_1(x)$ が大きい (裾を引いている) 事が判る。これは、 $S > 0.1$ の場合は、 σ_1 を変化させた方が許容限界外の発生確率が高くなる (L_{avr} が短くなる) 事を示している。 $\Delta D = 4.8$ の場合も同様の原因であった。従って、本節の L_{avr} の変化の様子の原因は、上記条件下で ΔD を一定とすると、ばらつき (σ_1) を変化させた方が平均値 (μ_1) を変化させるより許容範囲外発生確率の変化が大きい事に起因している。

一方、 $f_2(x)$ (図8下図) においては、 ΔD の大小に対応して、 L_{th} 後の傾きが変化する事が判る。但し、 μ_2 を変化させた場合と σ_2 を変化させた場合の $L_{avr}-D_{avr}$ 曲線には、 $f_1(x)$ の様な差異はみられない。

以上の数値実験結果をまとめると、(1) 検査パラメータの中では $f_1(x)$ のばらつきが最も $L_{avr}-D_{avr}$ 曲線に与える影響が大きく許容限界外の発生確率の変化が原因である、(2) $f_2(x)$ は ΔD の大小に対応して L_{th} 後の傾きを変化させる、等の事が判明した。

〈4・3〉誤検出の影響 前節までで検査パラメータや欠陥状態パラメータの影響を把握した上で、本節では、誤検出による影響を考察する。

半導体製造ラインで多用されている画像比較型欠陥検査装置に関しては、ウエハ表面状態のゆらぎや装置自身のノイズ等によって誤検出カウントが正規分布に従うという実験的報告⁽⁷⁾がある。そこで本論文では、 $g(y)$ の近似関数として正規分布を仮定した。具体的には $g(y)$ を、 $y > 0$ 、 $\mu_n = 0$ で標準偏差 σ_n の発生確率分布とした。図10に $g(y)$ と $f_1(x)$ (Case C) の比較例を示す。Case C を選んだ理由は、 L_{avr} と D_{avr} の関係に特徴点 (変曲点) があ

図10 誤検出の発生確率関数 $g(y)$ と $f_1(x)$ の比較

Fig. 10. Comparison between $g(y)$, false count function, and $f_1(x)$.

るからである。この例では、 $\sigma_n = 0.02$ では $g(y)$ の平均値 (= 0.016) が $f_1(x)$ の平均値 (= 0.043) より小さいが、 $\sigma_n = 0.05$ になると $f_1(x)$ とほぼ同等 (平均値 = 0.040) になる事が判る。

図11に、 $g(y)$ に上記関数を代入して数値実験を行った結果を示す。誤検出がない場合の $L_{avr}-D_{avr}$ 曲線は図7下図であるので、比較されたい。 $\sigma_n = 0.02, 0.05, 0.1$ の場合の結果を示した。 $\sigma_n = 0.02$ の場合、 $L_{avr}-D_{avr}$ 曲線の形状は似ているが、ほぼ同位置の S の値 (= 約 0.11) は $g(y) = 0$ の場合 ($S =$ 約 0.09) より大きい。誤検出が重畳された影響である。 σ_n が支配的になるに従って、 $L_{avr} = L_{th}$ の変曲点が顕著でなくなる事が判る。換言すれば、誤検出が顕著な場合、前述の L_{avr} と D_{avr} を統括する技術者にとっては、最悪の場合、あたかも現実的な検査条件が存在しないように誤解してしまう問題が発生する。誤検出がない事が理想的ではあるが、現実には管理したい欠陥検出には誤検出が避けられない場合⁽⁷⁾⁽¹⁵⁾もある。誤検出が否かを自動的に分離する装置が市販されているが、価格は数千万～数億円である。本考察により、誤検出がどの程度まで許容されるか、自動欠陥分離装置に投資を行うべきかに関する定量的な指標を得る事ができる。

以上の数値実験結果をまとめると、(1) 誤検出の増大によって現実的な検査条件を見失う可能性が高まる、(2) $g(y)$

図11 誤検出が平均不良率とクリーニング間隔の関係に及ぼす影響

Fig. 11. False count influence on the relation between average cleaning cycle and mean of defected die rate.

を正規分布と仮定した実験では平均値が $f_1(x)$ のそれを越えると悪影響が出る、等の事が判明した。

5. おわりに

ASIC 生産においては、欠陥管理方法によって変化する装置内異物数が歩留りと装置稼働率に影響を及ぼす中で、生産コストを最小にする事が重要である。第一報⁽¹³⁾では、欠陥管理(歩留り)と物流を統合化した生産性の検討モデルを提案し、数値実験による特性解析を行った。その結果統合化によってはじめて定量化できる現象の存在を示し、検査方法の最適化法について論じた。本論文ではその第二段階として、コスト検討に必要な、検査パラメータや欠陥状態、誤検出等によって変化する不良率やプロセス装置のクリーニング間隔の定式化を行った。加えて欠陥発生確率関数に対数正規分布を用いて特性解析を行った結果、以下の事項が明らかになった。

- (1) L_{th} 前後での x の違いが顕著な場合、 L_{th} 付近で $L_{avr}(S, N)$ の S に対する変化に関する変曲点が発生する。
- (2) 不良率を D_1 に抑えるには、 S を $L_{avr} = L_{th}$ とする値より小さく設定する必要がある。
- (3) $L_{avr}(S, N)$ と $D_{avr}(S, N)$ の関係においては、 ΔD が N を検討する必要があるかの指標となり、 $L_{avr} = L_{th}$ 前後で変曲点が存在する場合がある。
- (4) 欠陥発生確率関数では $f_1(x)$ のばらつきが最も $L_{avr} - D_{avr}$ 線に与える影響が大きい。その原因は、許容限界外の発生確率が高い事である。 $f_2(x)$ は ΔD の大小に対応して L_{th} 後の傾きを変化させる。
- (5) 誤検出の増大によって欠陥検査条件の現実解を見失う可能性が高まる。 $g(y)$ を正規分布と仮定すると、 $g(y)$ の平均値が $f_1(x)$ のそれを越えると悪影響が顕著になる。

これらの情報は、製造ラインを運用する上での検査パラメータの検討や投資効果見積もりに関する指針となると考える。今後の課題としては、物流情報も含めたコストモデルの定式化を行うとともに、提案するモデルを実ラインへ適用しその妥当性を検証すること等が挙げられる。

(平成 13 年 10 月 18 日受付, 平成 14 年 5 月 16 日再受付)

文 献

- (1) T. Nakata, K. Matsui, Y. Miyake, and K. Nishioka: "Dynamic Bottleneck Control in Wide Variety Production Factory", *IEEE Trans. Semicond. Manufact.*, Vol.12, No.3, p.273 (1999-8)
- (2) B.W. Hsieh, C.H. Chen, and S.C. Chang: "Fast Fab Scheduling Rule Selection by Ordinal Comparison-Based Simulation", in *Proc. Int. Symp. Semiconductor Manufacturing (ISSM'99)*, pp.5-3, San Jose, CA, (1999)
- (3) M. Ohkura, K. Mizuno, J. Yugami, A. Hikichi, and T. Nishida: "Semiconductor Process Line Scheduling Expert System" in *Proc. Int. Symp. Semiconductor Manufacturing (ISSM'95)*, pp.8-9, Austin, TX, (1995)
- (4) B. Ehteshami, R.R. Petrakian, and P.M. Shabe: "Trade-offs

in cycle time management: Hot lots," *IEEE T. Semicond. Manufact.*, Vol.5, p.101 (1992-5)

- (5) L.M. Wein: "On the relationship between yield and cycle time in semiconductor wafer fabrication," *IEEE T. Semicond. Manufact.*, Vol.5, pp.15-16 (1992-5)
- (6) 新田雄久:「次世代半導体装置の技術的課題」, ウルトラクリーンテクノロジー, 第 7 巻, 第 5/6 号, p.40 (1995)
- (7) K. Sakurai, A. Onoyama, H. Ishii, K. Oka, and K. Yamanishi: "Capture Rate Enhance Method of 0.1- μ m Level Defects by Pattern-Matching Inspectors", *IEEE T. Semicond. Manufact.*, Vol.13, No.4, p.434 (2000-11)
- (8) J. Kim, K.D. Wise, and J.W. Grizzle: "In-Situ Polymer Buildup Monitoring in Plasma Etching System," in *Proc. Int. Symp. Semiconductor Manufacturing (ISSM'97)*, p.B-37, San Francisco, CA (1997)
- (9) 大西 寛・古森秀樹・平松健司・豊田正人・山西健一郎:「第 42 回 VLSI FORUM」, (株) プレスジャーナル, 43 (1996)
- (10) R.K. Nurani: "Role of in-line process monitoring and control in wafer fab management," Ph.D. dissertation, Carnegie Mellon Univ. (1995-12)
- (11) W.W. Kuo, R. Akella, and D. Fletcher: "Adaptive Sampling For Effective Multi-Layer Defect Monitoring", in *Proc. Int. Symp. Semiconductor Manufacturing (ISSM'97)*, p.D-1, San Francisco, CA (1997)
- (12) R. Williams, D. Gudmundsson, K. Monahan, R. Nurai, M. Stoller, and J.G. Shanthikumar: "Optimal Sample Planning for Wafer Defect Inspection", in *Proc. Int. Symp. Semiconductor Manufacturing (ISSM'99)*, p.43, San Jose, CA (1999)
- (13) 櫻井光一・藤井 進・森田 浩:「ASIC 製造ラインにおける欠陥検査法に関する基礎的研究」, 電学論誌 D, 121, 2, p.231 (2001-2)
- (14) R.K. Nurani, R. Akella, and A.J. Strojwas: "In-Line Defect Sampling Methodology in Yield Management: An Integrated Framework," *IEEE T. Semicond. Manufact.*, Vol.9, No.4, p.506, (1996-11)
- (15) K. Sakurai, A. Onoyama, T. Fujii, K. Yamanishi, S. Fujii and H. Morita: "Solution of Pattern Matching Inspection Problem for Grainy Metal layers," *IEEE T. Semicond. Manufact.* Vol.15, No.1, p.118 (2002-2)

櫻井 光一 (正員) 1983 年 3 月慶応義塾大学工学部電気工学科卒業, 1985 年 3 月同大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月三菱電機株式会社入社。1992 年 9 月より 1993 年 8 月まで米国南カリフォルニア大学客員研究員。博士(工学)。欠陥検査, 歩留りの統計解析, デバイス構造や冗長回路の最適化等, LSI の生産性向上技術開発に従事。IEEE のシニア会員。

藤井 進 (非会員) 1970 年ウィスコンシン大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程修了。同年 10 月神戸大学工学部助手, 1971 年 11 月同助教授, 1984 年 3 月同教授となり, 現在に至る。生産システム工学, オペレーションズ・リサーチの研究に従事。Ph.D. 日本機械学会, 日本オペレーションズ・リサーチ学会(フェロー), 精密工学会, システム制御情報学会, INFORMS 等の会員。

貝原 俊也 (正員) 1985 年 3 月京都大学大学院工学研究科修了。その後三菱電機(株)生産技術研究所, 流通科学大学を経て, 2001 年より神戸大学情報知能工学科助教授。Ph.D. (1994 年ロンドン大学)。生産システム工学, 情報システム工学の研究に従事。日本機械学会, 日本 OR 学会, IFIP, IEEE などの会員。