

SEMI M56-0307

計量装置の測定変動と偏りに起因する費用成分の作業法

本スタンダードは、global Silicon Wafer Committee で技術的に承認されている。現版は 2006 年 11 月 21 日、global Audits and Reviews Subcommittee にて発行が承認された。2007 年 2 月に www.semi.org で、そして 2007 年 3 月に CD-ROM で入手可能となる。初版は 2003 年 11 月に発行された。

1 目的

- 1.1 シリコン製造において、製品の処置は通常計量装置の出力次第である。例えば、製作物の一部は、1 つまたはそれ以上の測定された出力特性に基づき出荷されるか、廃棄されるか、作り直されるかする。1 つのコストモデルが、ある仮定と条件下で運用する計量装置に関連する費用を見積もる方法を提供している。
- 1.2 本法は、計量装置供給者と使用者に、仕様書に適合する製品テストをする際、測定変動と偏りに起因する製品の分類誤りに基づく費用を決定するための標準方法論を提供している。
- 1.3 本法は、異なった P/T (精度/許容) 比を持つ測定装置購入の事前評価に役立つよう意図されている。また本法は、1 つの測定装置において、P/T 比が用いられるスループットモードあるいは他の装置のセットアップ要因によって変化する場合、異なったスループットモードでの操作比較を行うのに役立つよう意図されている。本法は、使用者が特定のプロセス能力と必要条件に基づく最適な費用解決策を選択する助けとなる。
- 1.4 本法には、伝統的な費用構成要素 (例えば装置、保守、操業およびスタッフのコスト) のみならず製品の費用データは含まれない; 各使用者は、設備に対し適用可能なビジネスモデルに基づき適正なデータを用いるべきである。

2 範囲

- 2.1 本法は、測定装置の変動と偏りに基づく製品の分類誤りに関連した費用を決定するための方法論を提供している。これらの費用は、仕様書に適合する製品を不合格にし、仕様書に不適合な製品を合格させると言った事と関連するものである。
- 2.2 本法は、使用者により指定された条件下で運用する 2 ないしそれ以上の測定ゲージ間の相対コスト比較を行うのに適用可能である。これらの条件に測定結果に直接的にあるいは間接的に影響を与える状況を含めることがある (例えば、周囲条件、スループット、レシピ)。本法は、単一装置の異なった運用条件での相対コスト比較にも適用できる。
 - 2.2.1 測定ゲージとは、測定に必要なシステムとサブシステムの具体的実現と定義される。少なくともシステムあるいはサブシステムの 1 つが異なったゲージは、比較目的に対しては異なったものと考えられる。
- 2.3 本法は、いかなる計量装置にも、また計量部を組み込んだいかなる装置の計量部分にも適用可能である。
- 2.4 本法は、計量装置が、測定されている項目について二進の判断をする、すなわち単に 2 つの結果が可能な (例えば、可否、通過可否、出荷かスクラップ行きか) 場合に適用される。データの不良分類のように、2 つ以上の結果がある判断のためのモデルは、本法の範囲外である。
- 2.5 本法の式を適用するために、使用者は、プロセス特性ないしは関心のある特性の確率密度関数 (PDF) ないし累積分布関数 (CDF) を見積もらなくてはならない。分布は理論的モデルに基づいても良いし、製造データから得られる経験的な情報によっても良い。
- 2.6 本法の式を適用するために、使用者は特定の運用条件下で比較されようとしている装置に関するすべての偏りと分散と、関心のあるプロセス特性について見積もることができなければならない。これらの値は測定システム能力分析 (SEMI E89 参照) から得ることができる。

2.7 本法の方法論を適用するために、使用者は測定結果として判定される正しい分類と誤った分類に基づく費用を見積もらなければならない。そのような費用の見積りは、測定が行われる製造プロセスを記述するのに用いられるビジネスモデルから得られる。したがって、異なった使用者は、彼らの計算に異なった要因を含んでいる可能性があるため、異なった費用見積もりに到達する可能性がある。

2.8 本法から得られる結果は、評価対象となったそれぞれのプロセス特性と計量システムの測定変動と偏りに基づく費用成分である。

注1: 測定バラツキ(とその分布)について関連情報 1(図 R1-1)に図示する。広く(一般的に)利用されている測定バラツキを評価する方法としては分散、標準偏差、分散成分がある。特定の評価尺度としては繰り返し精度や再現性がある。

注2: 偏り(バイアス)は測定結果の不確かさを表す成分の一つである。ひとつあるいはそれ以上の誤差要素が偏りに影響を与えることがある。真の値や母平均は共に未知である。真の値は関係者が納得する値を用いて求めることができる。もし測定バラツキを適度なレベルに抑えることができるだけの十分な回数の測定を行えば、サンプル平均から母集団平均を求めることができる。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

ここで:

$\bar{x}$ = サンプル平均
 N = 測定回数
 x_i = i 番目の測定値

2.9 本法は、測定変動と偏り以外の他の不確実な要因に関連する費用は考えない。

2.10 本法は、誤分類に関わる課題に焦点を合わせているが、計量機器による正しい分類に関連する費用を含めるために拡張可能である。

2.11 本法は、シリコンウェーハ製造において用いられる計量装置を評価するために開発されたものであるが、適切な修正を加えることで他の種類の計量装置に拡張可能である。

注意: このスタンダードはその使用に関連したすべての安全問題を取り扱うことを意図していない。このスタンダードの使用者は、その責任において、適切な安全および健康上実施すべき事柄を確立し、また使用前に法規制やその他の制限への適用性を判断するものである。

3 制限

3.1 本法の適用には、すべての測定分散と偏り、プロセス特性分布、および正しい分類と誤分類の費用を正確に特徴づける必要がある。正確に行われていない場合、その結果として生じる計算は間違いである可能性がある。

3.2 本法の適用には、測定分散と偏りは考察している測定範囲間隔にわたって一定であることが要求される。そうでない場合は、その結果として生じる計算は間違いである可能性がある。

3.3 本法は、2つの畳み込まれた分布、プロセス特性変動および測定変動の場合だけを考察している。(測定偏りあるいは分散が測定値の関数となっている様な場合に要求されるような)追加的な分布を持った場合の考察は、本法の範囲外である。

3.4 (1)複数ゲージによる測定、(2)同一ゲージを用いた多回検査、(3)複数特性に基づく決定をする場合への拡張は、本法の範囲外であるが、しかし、そのような拡大適用への情報は、使用者の便宜のため関連情報 1 に用意されている。

3.5 本モデルは、含まれる費用構成要素について厳密な情報を含んでいるSEMI E35 で開発された様な、コスト・オブ・オーナーシップ(COO)と混同すべきではない。

4 参照スタンダードおよび文書

4.1 SEMI スタンダード

SEMI E35 — Guide to Calculate Cost of Ownership (COO) Metrics for Semiconductor Manufacturing Equipment

SEMI E89 — Guide for Measurement System Analysis (MSA)

SEMI M1 — Specifications for Polished Monocrystalline Silicon Wafers

SEMI M59 — Terminology for Silicon Technology

4.2 ISO 文書¹

International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology, Second Edition [VIM]

注意: 別途指示のない場合、引用されたすべての文書は最新の出版バージョンである。

5 用語

5.1 計量法に関連した一般用語はVIMで定義されている。

5.2 測定システム能力分析に関連した追加の用語はSEMI E89 で定義されている。

5.3 シリコンウェーハ技術に関連した用語は、SEMI M59 に定義されている。

6 作業方法の概要

6.1 関心のある特性に対してプロセス分布が、見積もられるか、または決定される。

6.2 関心のある特性に対して偏りと標準偏差が、比較ないし評価されるそれぞれの測定装置に決定される。

6.3 α および β の値が、規格の特徴 (LSLのみ, USLのみ, または両方か) によって適切な式から計算される。

6.4 費用が、適用できるビジネスモデルに基づき、4つのあり得る測定結果のそれぞれに振り当てられる。

6.5 測定変動から生じる費用成分が、評価ないし比較対象のそれぞれの測定装置に対し計算される。

6.6 測定変動に基づく費用が、適用に当たり最も費用効率の良い測定解決策を確立するために比較される。

7 手順

7.1 検討すべきプロセス特性についてPDFを見積もる。これは、プロセスを表現する経験的なデータを用いて行える。実際のデータが離散的PDFを作るのに用い得るけれども、PDFモデル (例えば対数正規分布) に合うようにパラメータを用いたデータを使用するのが時として便利である。

7.2 比較されるべき各々の測定ゲージの偏りと標準偏差が既に分かっているなら、SEMI E89 に準拠して定める。

注 3: 母集団の標準偏差は実験的に求めたサンプル標準偏差から求めることができる:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

ここで:

n = データ個数

x_i = i 番目のデータ値

$\bar{x}$ = サンプル平均

7.3 すべての場合において、PDFを広くさせないため測定の影響を考慮に入れる。これは、測定領域内の各々の点において繰り返し測定の平均を計算するか、あるいはプロセス特性のPDF, $f(x)$ と測定変動のCDF, $G(u)$

¹ International Organization for Standardization: ISO Central Secretariat, 1, rue de Varembe, Case postale 56, CH-1211 Geneva 20, Switzerland, Telephone: 41.22.749.01.11; Fax: 41.22.733.34.30; Website: <http://www.iso.ch>

のデコンボリューション (deconvolving) によってなされる。一般に、 $G(u)$ は算術平均が偏りに等しいガウス (正規) 分布と見なされる。すなわち、

$$G(u) = \Phi(u) = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_M} \exp\left[-\frac{(x-\delta)^2}{2\sigma_M^2}\right] dx \quad (3)$$

ここで:

δ = 偏り

σ_M = 測定分布の標準偏差

注 4: 量 σ_M には、 σ_M が確立された時間間隔内での、偏りの変化の影響が含まれている。

7.4 α および β を次のように計算する (注 4)。 α および β 式の中の記号は以下のような意味を持っていることに注意すること。

$f(x)$ = プロセス特性 x の PDF

USL = 規格上限

LSL = 規格下限

$\Phi(u)$ = ガウス分布を持った CDF (7.3 の式 (3) 参照)

7.4.1 USL のみを持つ特性に対しては、 α および β の計算には下記式を用いる。

$$\alpha = \int_{-\infty}^{USL} \left[1 - \Phi\left(\frac{USL - x + \delta}{\sigma_M}\right) \right] f(x) dx \quad (4)$$

$$\beta = \int_{USL}^{\infty} \left[\Phi\left(\frac{USL - x + \delta}{\sigma_M}\right) \right] f(x) dx \quad (5)$$

7.4.2 LSL のみを持つ特性に対しては、 α および β の計算には下記式を用いる。

$$\alpha = \int_{LSL}^{\infty} \left[\Phi\left(\frac{LSL - x + \delta}{\sigma_M}\right) \right] f(x) dx \quad (6)$$

$$\beta = \int_{-\infty}^{LSL} \left[1 - \Phi\left(\frac{LSL - x + \delta}{\sigma_M}\right) \right] f(x) dx \quad (7)$$

7.4.3 規格上限および下限の両方を備えた特性に対しては、 α および β の計算には下記式を用いる。

$$\alpha = \int_{LSL}^{USL} \left[1 - \Phi\left(\frac{USL - x + \delta}{\sigma_M}\right) \right] f(x) dx + \int_{LSL}^{USL} \left[\Phi\left(\frac{LSL - x + \delta}{\sigma_M}\right) \right] f(x) dx \quad (8)$$

$$\beta = \int_{-\infty}^{LSL} \left[\Phi\left(\frac{USL - x + \delta}{\sigma_M}\right) - \Phi\left(\frac{LSL - x + \delta}{\sigma_M}\right) \right] f(x) dx + \int_{USL}^{\infty} \left[\Phi\left(\frac{USL - x + \delta}{\sigma_M}\right) - \Phi\left(\frac{LSL - x + \delta}{\sigma_M}\right) \right] f(x) dx \quad (9)$$

注 5: α および β の計算に関する背景情報は関連情報 3 に記載されている。

7.5 2 値決定モデルを使用する。測定に基づく判定が合格か不合格かに分類され、項目が本来適合か不適合かで有る場合には、単に 4 つの結果だけが存在する。

- 適合項目を合格にする、
- 適合項目を不合格にする、(アルファ誤り)
- 不適合項目を合格させる(ベータ誤り)、そして
- 不適合項目を不合格にする。

これらの結果に対応する確率は、それぞれ $1-\alpha$, α , β , $1-\beta$ である。

7.6 コストモデルを定義するには、製造プロセスに対して用いられたビジネスモデルを基礎として上記 4 つの判定の各々に対する費用を下記のように割り当てる。

- c_{pc} : 適合項目を合格にする場合の費用
- c_{fc} : 適合項目を不合格にする場合(アルファ誤り)の費用
- c_{pn} : 不適合項目を合格とする場合(ベータ誤り)の費用
- c_{fn} : 不適合項目を不合格にする場合の費用

7.6.1 2 つの正しい結果に対する増加費用はゼロと置く(c_{pc} および c_{fn})。

7.6.2 製造プロセスに用いられたビジネスモデルに基づき、誤った結果に対し増加費用、 c_{fc} および c_{pn} を割り当てる。

7.7 測定変動の結果から生ずる誤分類による費用を、7.6 で割り当てられた費用と、 α および β の発生確率を基に、次のように計算する。

$$\text{cost} = c_{fc}\alpha + c_{pn}\beta, \quad (10)$$

α および β に対しては、規格の特徴 (LSL のみか、USL のみか、それとも両方か) によって 7.4 に記載されている適切な計算式を用いる。

注 6: この計算の一例として関連情報 4 を参照せよ。

7.8 もし、誤分類のみならず正しい分類の費用を含めたいなら、測定変動による総費用を、7.6 に記載されている費用増加分と α および β 誤りの発生確率を基に次のように計算する。

$$\text{cost} = c_{pc}(1-\alpha) + c_{fc}\alpha + c_{pn}\beta + c_{fn}(1-\beta), \quad (11)$$

α および β に対しては、規格の特徴 (LSL のみか、USL のみか、それとも両方か) によって 7.4 に記載されている適切な計算式を用いる。