

Readout

HORIBA Technical Reports

特集 半導体プロセス計測

August 1996 ■ No.13

21世紀半導体産業における計測の問題

Problems in Measurement in the Semiconductor Industry
in the 21st Century

高須新一郎

Shinichiro TAKASU

(Pages 4-11)

株式会社 堀場製作所

21世紀半導体産業における
計測の問題Problems in Measurement in the Semiconductor
Industry in the 21st Century

1. はじめに

現在、読者の中で電子デバイスとは無縁と言い切れる人は皆無となった。テレビ、各種通信装置、パソコン、ワープロは言うに及ばず、各種交通手段、各種生活機器から娯楽機器に至るまで広く電子デバイスが使用されている。この普及は、DRAM^{*1}、LOGIC^{*2}、DSP^{*3}など各種の電子デバイスの単位機能のコストが年々低下した結果である。しかも電子デバイスは、フォークランド紛争や湾岸戦争に示されたように、防衛機器の中心的機能に関係しかつ輸出入と深く関連する結果、国家が深く関心を持っているにも関わらず最もグローバル化しているにも関わらず、誕生以来わずか半世紀に過ぎない若い産業である。

この様に高機能化しつつ価格低減を達成するためには、もちろん設計における多大の努力の他、ウエハ径の増大とプロセスの進歩による歩留まり向上がある。この延長線上に、最近300mmウエハの製造ライン投入計画が話題に上っている。この状況をうけて、SEMIジャパンでは、シリコン製造業者全世界の集まりからの提案をうけて、300mmシリコンウエハに関するアンケート調査を行った¹⁾。結果をまとめると次の通りである。

- 1) 300mmシリコンウエハのデバイス製造への投入は1998-1999年に始まり、2002年に立ち上がり始まる。
- 2) テスト製造並びに量産開始時の線幅は0.25 μ mが中心で、量産時は0.2~0.18 μ mとの答えもデバイス製造側にかなり見られる。露光は光露光方式が主である。
- 3) 製造にあたっては枚葉方式クラスタツール方式が主力となろう。
- 4) シリコンウエハの性質中重要と考える特性に対しては、ウエハ製造側とデバイス製造側ではやや異なった特性をあげている。製造管理に必要な計測についての指摘がウエハメーカー側に根強くある。
- 5) デバイス製造側のウエハに関する第一の要求事項は品質の安定性である。
- 6) 国際的な共同研究開発やフリーアクセス可能なデータベースの要望が大である。
- 7) その他

これらを基に今後の計測に関する問題を考える事にする。

2. デバイス、ウエハ製造における計測に対する要望

プロセスにおける計測は価値を生まないばかりか、コスト上昇の元凶と言い切るデバイス製造メーカーの技術者がいる。また、プロセスにおける計測はプロセス並びに出荷品の信頼性確保以外の何物でもないと言う技術者がいる。これら両方の立場をよく理解する事が良い計測器を作る第一歩であると筆者は確信している。

両者には次のような考え方が根底にある。

*1 DRAM:Dynamic Random Access Memory
随時書き込み読み出しメモリ

*2 LOGIC:Logic Device
論理素子

*3 DSP:Digital Signal Processor
デジタル信号処理装置



SEMIスタンダード 顧問
理学博士（東京大学）

高須新一郎

Shinichiro TAKASU, Ph.Dr.

<略歴>

1928年 福島県生まれ
1951年 東京大学理学部鉱物卒業，
同大学院入学
1952年 東京大学鉱物学教室助手
1955年 東京芝浦電気(株)入社，
マツダ研究所勤務
1958年 理学博士（東京大学）
1976年 超LSI研究組合共同研究所
出向
1980年 (株)東芝 総合研究所 技監
1984年 東芝セラミックス(株)
技監
1993年 SEMIスタンダード 顧問
1970-1988年
東京大学大学院非常勤
講師

<専門分野>

材料研究開発とキャラクタリゼイ
ション，ならびにプロセス適用と
トラブルシューティング。現在，
半導体産業分野のスタンダードな
らびに関連動向の調査

<著書>

結晶育成基礎技術（東京大学出版
会），その他

<趣味>

科学映画，ビデオ制作

- 1) デバイスメーカは利益をださねばならない。利益は投資に対するアウトプットで決まる。
- 2) 不良に気付くのが製品のコンセプト段階では，直しに殆どコストがかからない。設計段階だと設計図面の書き直しが入る。試作段階だと再設計，再試作が必要。製造段階だと材料，時には工場の見直しまで入る。出荷後に不良品がでると，対策に膨大なコストがかかる。可能な限り不良が出荷されない様に，また次工程に不良を持ち込まないのが計測の役目である。ある意味で保険的役割である。
- 3) 現状，多くの計測はオフラインである。従って信頼性を確保しようと計測をラインに導入すると，スループットが低下する方向になる。とくに破壊計測では，それまでの材料や付加価値作業を破棄する事になり，かつ，計測の間は次工程に検査対象ロットは進めず，仕掛かり在庫が増加し保管コストが増大する（クリーンルーム内に保管が必要！）。
- 4) 大口径ウエハの投入では，ウエハ径が増大し計測面積がふえる(300mmウエハは14枚で1m²)だけでなく，チップはより微細化し複雑になってくるため工場投資が膨大になる。これに加え，計測のための投資が増え，かつスループットが落ちるのではかなわない。

このようなデバイスメーカの言い分はウエハメーカにも共通で，以上の言い分を計測装置への要求に見直すと，次のようになる。

- 1) ラインのスループットを低下させないインライン “in situ” 計測方法，機器を。
- 2) 非破壊，非接触計測を。
- 3) 大口径ウエハを，高精細，高速に全面を計測しマッピング可能な計測装置を。

このような考え方は，特に1980年代後半からCoO(Cost of Ownership)がSEMI-MATECH^{*4}で提唱導入され，製造装置の評価規格としてSEMI規格に取り入れられて以来²⁾，アメリカで強く意識され始めた。

次に計測のコストを300mm化の流れの中でCoO的見地に立って考察する。

3. 工程流れと計測

3.1 計測時間の目安

デバイス，ウエハ製造における計測の役割は，前述のように，次工程に不良品を流さない事と，出荷品の保証である。特にデバイス製造のように，極めて多くの単位工程の集積として成り立っている生産では次工程に不良を流さない事が重要である。この目的を達成する為に計測がなされていると言っても過言ではない。

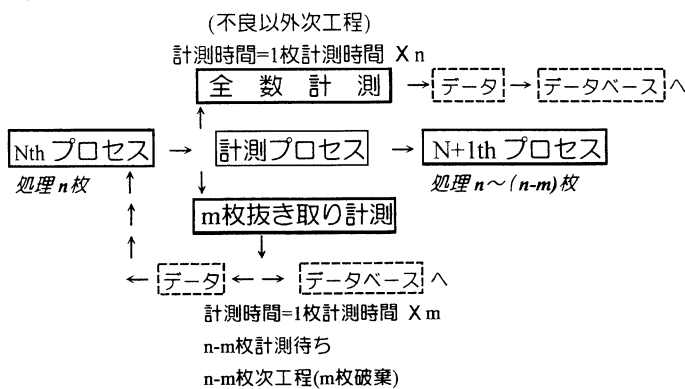
破壊検査試験が必要な場合には，製造用ウエハの破棄を防ぐために，いわゆるテストウエハの多量使用，場合によっては製品用の3倍以上のウエハが投入されている事が，SEMIのアンケート調査で示されている。300mmウエハ化に際してはこの

^{*4} SEMATECH
1986年に設立された米国の官民共同の半導体の研究開発会社

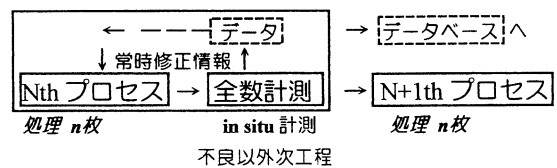
*5 ミニエンバイロメント(Mini-Environment) 周囲の環境と隔絶した容器。薬品やバイオ工業でも注目されており、ISO規格化がされようとしている

テストウエハの多量使用によるコストの圧迫は無視できない。上述の用にアンケート調査で製造システムとして、枚葉クラスタツール(図4)やミニエンバイロメント*5製造システムの多用も示されている。従ってここでは、200~300mmの大口径ウエハ使用時の工程間計測について考えて見よう。

1) オフライン計測



2) クラスタツール内計測 a)



3) クラスタツール内計測 b)

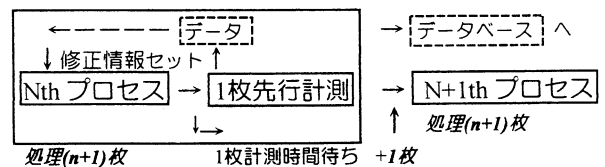


図1 単位プロセス工程と計測の関係
Relationship between unit process stage and measurement

図1は第n次と第n+1次単位工程間にテストが挿入されたとき、計測がオフライン計測における全数検査と抜き取り検査の場合と、クラスタツール内に計測が挿入された場合の全数計測と先行テストウエハ計測の比較を示す。オフライン計測では、工程信頼性確保の意味で試験間はストッカーに停留させると仮定した。全数検査の場合は非接触、非破壊が原則であり、コストは計測速度が大きな要因をなし、その速度はプロセス速度以下である事が要求される。単位工程のスループットが月20,000枚のラインに組み込まれた計測のスループットは、最低で2.2分/枚が要求される。実際には休止時間、保守点検が必要であり目安は1分/枚となる。

抜き取り試験でも計測待ちは当然必要であり、抜き取り率は計測の信頼性と密接に関与する事に注意しなければならない。信頼性を上げるために抜き取り率をどの位に取るかは、破壊計測か非破壊計測か、並びにテストウエハ価格とともに計測コストに大きな影響をもたらす。この場合長時間を要する計測がプロセスに導入不可能かどうかは次項で考察する。

3.2 長時間を要するオフライン計測の場合

現在ウエハ表面の重金属汚染計測管理では、気相分解法(Vapor Phase Decomposition Method: VPD)または全反射蛍光X線法が用いられている。

前者は超クリーン化された容器の中で、HFあるいはHF+HNO₃を蒸留しながらウエハ表面の酸化膜あるいはシリコンを溶解し、溶解液を原子吸光分析装置で分析

する方法で、 $10^8 \sim 10^{10}$ atoms/cm²程度の高感度表面分析法である。本法の欠点は、気相分解に8~10時間を要する点であるが、この欠点は同時に多数のウエハを夜間に分解し、日中に機器分析する事で切り抜けている。一方、VPD法が破壊法であることの欠点は、テストウエハの挿入使用で切り抜けられる。しかしながら、大口径ウエハは価格が高いため、テストウエハの使用が問題となるが、これはウエハを再使用する事で切り抜けられると考えられる。

ロット編成は、300mmウエハの場合、ウエハキャリヤ規格から13枚(12+1テストウエハ)か25枚(24+1テストウエハ)と考えられるから、20,000枚のラインでは1日の処理ロットはテストウエハを別に考え、30日稼働と考えると1日の必要分解量はそれぞれ56枚ないし28枚となる。これだけを夜間に分解するとし、原子吸光分析装置の処理速度は日中実働6時間とすれば6~12分/枚の計測速度で十分である。

しかしながら、この方法の問題点は先に述べたようにロットの最低10時間以上の停滞が免れない点と、ウエハ内分布を測定できない点である。これらの欠点を救うためには全反射蛍光X線装置が考えられるが、微量汚染の計測には長時間、とくに分布計測には長時間を要する。このため、X線源強度を上げてS/Nの向上をはかり、かつ自動試料交換装置を付ける必要がある。

3.3 計測の工程中への組み込みと問題点

大口径化で必須と考えられるクラスタツール・システムにおける計測について考えてみる。図2は、大口径ウエハを使用した図1(2),(3)の場合に対応できるものを考えている。inポート(ローディング)にセットされたウエハは処理クラスタで付加処理後、冷却クラスタで室温まで冷却され計測クラスタに導かれ、計測されoutポート(アンロード)内のカセットに挿入される。クラスタツール内は常時適切な雰囲気制御される。処理1と2が同じ場合は並行処理となるが、1,2を異なった処理として組み合わせる事も可能である。

クラスタツール使用の毎葉システムでのスループット向上にはクラスタツールへ計測装置の組み込みが必要である。この場合、図1のように全数計測かサンプリング計測が考えられる。全数計測ではテストウエハは不要だが、並行処理を行う場合にはかなりの高速計測が必要であることが了解されよう。もし高速化できない場合は、計測クラスタを増やすか、処理、冷却クラスタの削減を行わねばならない。サンプリング計測の場合は、スループット向上、言い換えれば計測コスト低減のために、各单位工程毎にテストウエハを各ロットに追加する必要があることが図1、図2から了解されよう。全数計測では計測速度がプロセス処理速度と同じまたはそれ以下で、サンプリング計測はできる限り高速計測が必要なことも了解されよう。

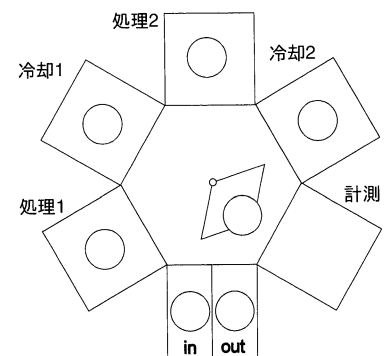


図2 クラスタツール内における
オフライン計測
Off-line measurement in cluster
tools

両者ともin situ計測を処理あるいは冷却クラスタに組み込む時は計測速度向上に有利ではあるが、これには種々の制約とともに、処理工程時間全てを利用できない制約がある。

一例として製膜工程でのクラスタツール使用の場合における膜厚計測を考える。計測は全数計測でテストウエハの計測はないとする。製膜工程の一例として、エピタキシャル成長時の温度と反応ガスの変化を図3に示す。膜厚計測での問題は、面内計測点数、計測膜厚範囲、要求精度である。また、計測をどの時点で行うかも問題となる。成長中にモニタし、設定膜厚になったら成長を停止し冷却するが、冷却中に計測するのか、冷却後計測室に引入れ計測するのかなども考慮しなければならない問題である。膜成長終了時点での計測は望ましい方法ではあるが、高温下(1000~1150℃)で反応ガス(SiH₄, SiH₂Cl₂, SiHCl₃など)中での多数点計測が必要となる。冷却中では反応ガスはないが、刻々変化する温度を考慮する必要と、冷却を反応室でやるか、冷却室でするのが問題となる。計測室に引き入れての計測では、いずれの問題もないが、300mmウエハの場合は装置の大型化や計測距離が問題になる。計測時間は、成長中に最も高速性が要求されるが、後二者では数分以内で大きな問題はないと考えられる。酸化膜形成や膜堆積の場合はガス種、温度の点と膜厚範囲の問題を除けばそれほど差はないであろう。

エッチング終点の検知は膜厚の検出もあるが、パターンエッチングの場合を考えると、反応終了点を反応ガスの組成変化で計測するのが望ましいようである。この場合、計測ポイントや検出感度により反応終点の検出に遅速がでる恐れがあり、とくに、プラズマを使用する場合には注意が必要である。

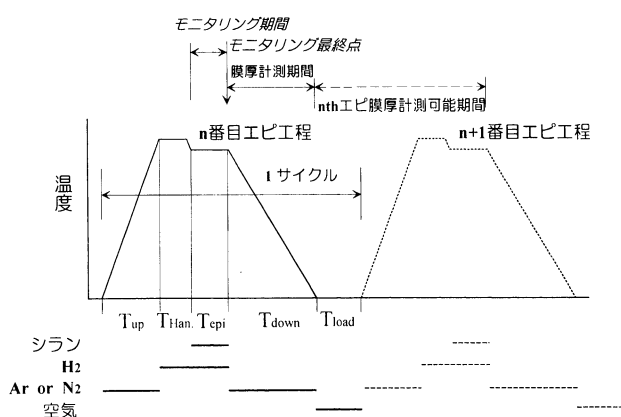


図3 エピタキシャル成長時の計測可能位置
Possible measurement locations in epitaxial growth

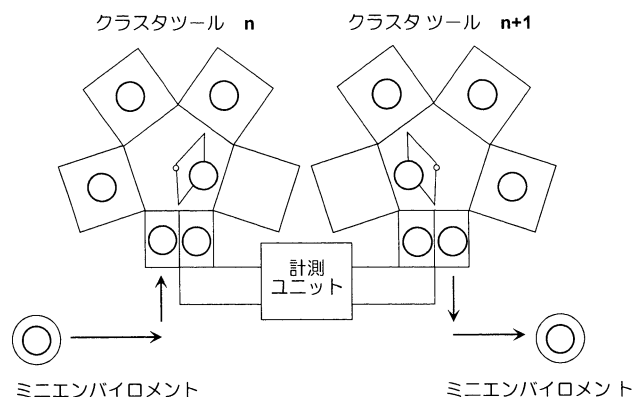


図4 クラスタツールの計測装置による連結
Interfacing with cluster tool measuring equipment

3.4 ミニエンパイロメントシステムに対する影響

ミニエンパイロメント(ME)の使用は最近日本以外ではかなり進展し、先のSEMIの調査にも現れている様に、日本のメーカーでも追々採用されるであろう。導

入を妨げている理由の一つにMEの価格が上げられている。現在のデバイス製造現場では、オフライン計測が主力で、計測待ちがかなりある。この停滞中に使うMEが多数に上り、かつ停滞時のためにストックを多数用意する必要がある。とくに、300mmでは、一枚当たりの仕掛かり価格が高価で、仕掛かりコストが膨大になるであろう。

クラスツール内で計測でき、かつ両クラスツールのスループットが等しければ、計測停滞によるMEの増加はない。さらに図4に示す様に、二つのクラスツールを処理速度の等しい計測装置で連結できれば、計測クラスタを製造装置側に付ける必要がなくなる。この場合は受け渡しの規格の統一が重要である。

4. 計測コストの推定

単位計測コストは、単位当たりの計測装置価格、用力費、消耗品コストの積算のみではない。原価消却やクリーンルーム内設置面積に対応するコスト、人件費など全てを積算しなければならない。この考え方の基本はSEMIスタンダード所載のCoOに基づき、EXCEL^{*6}やLotus1-2-3^{*7}など適当な表計算ソフトを用いれば、用力や消耗品コスト変化、計測速度変化等の条件変更の影響を容易に計算できる。

^{*6} EXCEL
米国Microsoft社の登録商標

^{*7} Lotus 1-2-3
米国Lotus Development社の登録商標

図5はCoOのスタンダードの考え方に従って先に示したVPDのコストの計算結果で、同時分解試料数によるコストの低減と、サンプリング数依存性(300mmのテストウエハ価格を60,000円に仮定)を示す。図6はオフラインでの抜き取り破壊計測コストの計算例である。計測中のロット停滞コストは、停滞位置と時間により変化するために含んでいない。両図から、計測コストが使用する計測装置の価格よりも、計測速度や使用様態に大きく依存する事がわかる。

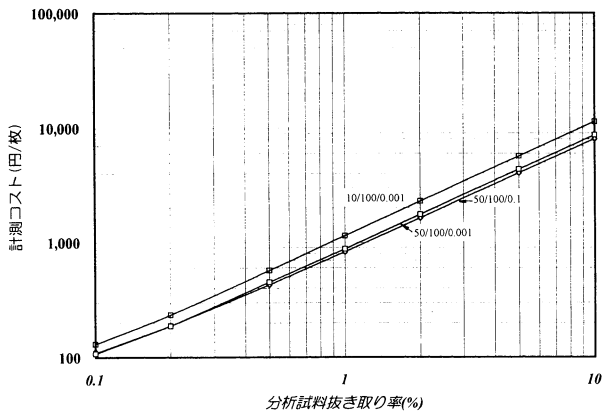


図5 VPD法による分析コストの推定
Estimating analysis costs by the VPD method

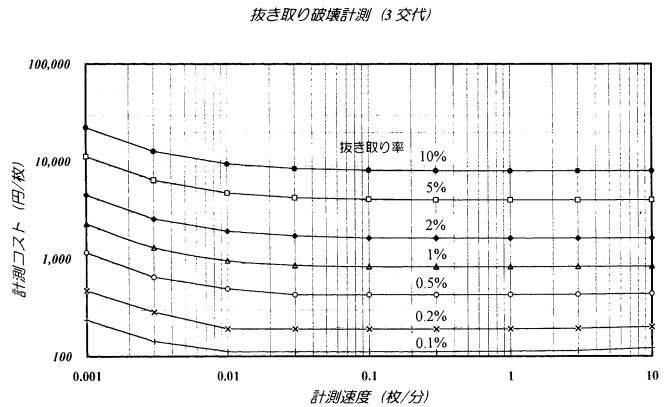


図6 オフライン抜き取り破壊検査計測3交代勤務の計測コスト計算例：
Off-line random sampling damage inspection and measurement
example of cost calculation of measurement in a 3-shift workday:
図中記入の数字は同時分解処理数(枚)/薬品コスト(円/枚)/計測速度(枚/分)
Figures in diagram indicate number of simultaneously separable processes
(wafers)/cost of chemicals (yen/wafer) /measurement speed (wafer/minute)

5. 結びにかえて

後、5年となった21世紀における半導体製造装置は、従来とはかなり異なった様態を示すであろう。先に述べたように、ウエハの300mm化とクラスツールやミニエンパイロメントの使用であり、計測装置は全体コスト低減に大きな役割を果たす。また図7のように、工場、会社、その他の組織のデータベースとネットワークで連結されることは容易に想像され、計測装置にSEMI規格のネットワークとの連結が要求される事は必然と考えねばならない。さらに、製造装置を連結する計測装置のコンセプトもあり得る事に注意する必要がある。これらには規格の共通化が必要になり⁴⁾、十分な調査と装置メーカーとデバイスメーカー間の相互の綿密な話し合いが大切となろう。

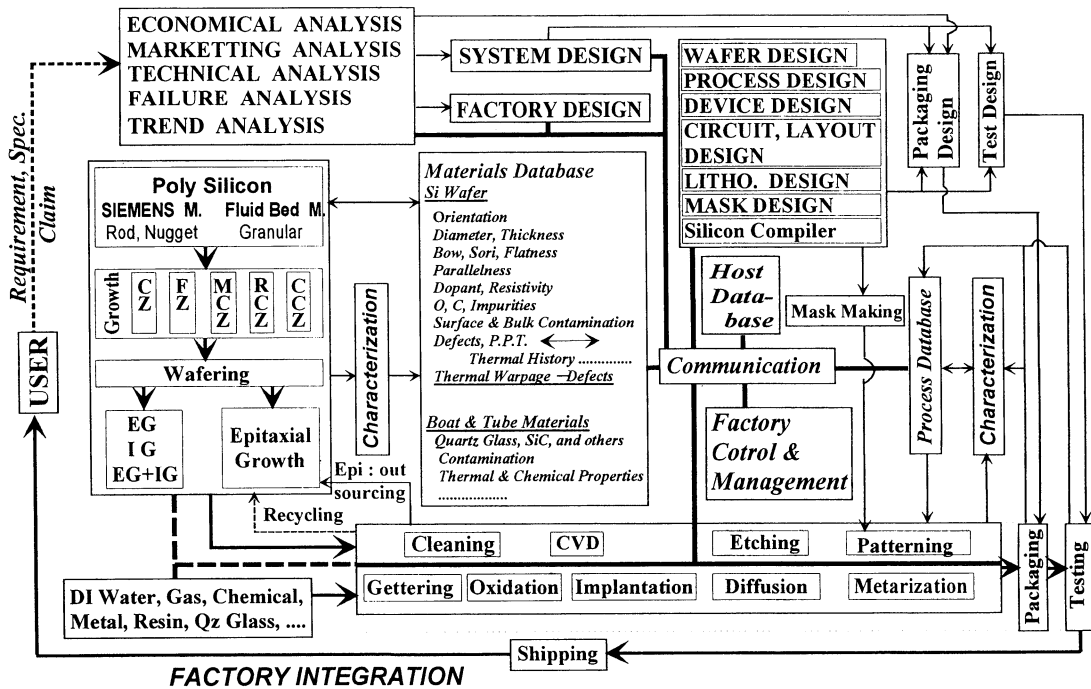


図7 LSI製造における各種情報の流れと通信連結
Flow of information in LSI production and coupling of information

<参考文献>

- 1) SEMI NEWS, Vol. 13 No2. P7-11 (1996)
- 2) SEMI STANDARD, Cost of Ownership for Semiconductor Manufacturing Equipment Metrics; E35-95, Guide For Cost of Equipment Ownership Comparison Metric; E35.1-95.
- 3) SEMI STANDARD, Minienvironment関連 ; E19-91, E19.1-91, E19.2-91, E19.3-91, E19.4-94, E44-95, E45-95, E46-95, E47-95, E48-95, Clustertool関連 ; E20-91, E21-91, E21.1-92, E22-91, E22.1-91, E23-91, E24-92, E25-92, E26-92, E26.1-92.
- 4) SEMI STANDARD, Communication関連 ; E4-91, E5-96, E31-91, E30-95, E32.1-94, E36-95, E37-95, E37.1-96, E37.2-95, E38-96, E38.1-95, E39.95, E39.1-95, E40-96, E41-95, E42-96, E42.1-96, E50-95, E53-96, E54-96.

Problems in Measurement in the Semiconductor Industry in the 21st Century

This paper summarizes the conditions placed on measurement technology and equipment required in the 21st century based on the results of a questionnaire survey conducted by SEMI Japan (Semiconductor Equipment and Materials International Japan). The purposes of measurement in semiconductor processes are to prevent the flow of defective products to subsequent processes at each stage of production and to ensure the final delivered product. However, how to efficiently achieve these in a short time is most important. The key word for semiconductor production in the future is "site integration" that utilizes larger size wafers (300 mm), cluster tools, and mini environment systems. This paper studies development themes in measurement technology and equipment required here, in particular from the aspect of cost.

