

SEMI E78-0912

装置のための静電気放電(ESD)と静電気吸着(ESA)の評価と管理へのガイド

NOTICE: This translation is a REFERENCE COPY ONLY. If differences should exist between the English version and a translation in any other language, the English version is the official and authoritative version.

免責事項： この SEMI スタンダードは、投票により作成された英語版が正式なものであり、日本語版は日本の利用者各位の便宜のために作成したものです。万が一英語と日本語とに差異がある場合には英語版記載内容が優先されます。

SEMI スタンダード日本語翻訳版をご利用にあたっての注釈を本文の末尾に記載しております(「すべきである」「しなければならない」について等)。

本スタンダードは、Metrics Global Technical Committee で技術的に承認されている。現版は 2012 年 8 月 30 日、global Audits and Reviews Subcommittee にて発行が承認された。2012 年 9 月に www.semiviews.org および www.semi.org で入手可能となる。初版は 1998 年 9 月発行。前版は 2009 年 3 月発行。

1 目的

1.1 この文書の目的は、半導体製造装置の中で静電気電荷および電界に起因した生産性への悪影響を最小にすることである。本文書は、半導体製造に使われる装置が静電的な両立性を確立するためのガイドである。半導体工場全体の静電的な両立性は、SEMI E129 に述べている。

1.2 静電気の表面電荷は、半導体製造環境の中で多くの望ましくない効果を引き起こす。

1.2.1 静電気放電 (ESD : electrostatic discharge) は製品とレチクルに損傷を与える。また、ESD イベントは電磁干渉 (EMI : electromagnetic interference) を引き起こし、その結果、設備故障が発生する。

1.2.2 帯電したウェーハやレチクルの表面は異物を吸着 (静電気吸着、または ESA : electrostatic attraction) し、不良率を増やす。また、製品に存在する電荷は、装置故障や製品自体の破壊の原因となることがある。

1.2.3 静電気による装置動作上の問題と製品欠陥の増加は、半導体製造装置の所有コスト (COO : cost of ownership) へのマイナス要因となる (SEMI E35 を参照のこと)。

1.3 この文書は、装置製造業者が装置の設計および試験を行う際に使用される。記載された試験方法は、装置の動作確認と装置の購入仕様で両立性を確認するために装置製造業者によって使用される。

1.4 半導体プロセス技術は、より微細化の方向に進み続けるであろう。静電気の許容可能なレベルは、微細化にともなって減少するであろう。この文書は、製造中の製品に適した装置の静電気限界に関する推奨値を規定する。International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)に含まれる形状サイズを参照。

2 範囲

2.1 この文書の適用範囲は、測定方法と下記に示す物体表面の帯電の最大推奨レベルに関するガイドに限定される。

- 製品、またはレチクル
- キャリア
- 装置とミニエンバイロメントのロードポート部の部品

2.2 この文書には、製品、レチクル、キャリア、製造装置またはミニエンバイロメントのロードポート部での静電気の最大推奨レベルの表が示されている。この目的は以下の通りである。

- ESD による製品、レチクル、装置の損傷を低減する。
- ESD イベントによる装置のロックアップ問題を低減する。
- 帯電した表面への異物吸着を低減する。

2.3 この文書は、SEMI E43 および静電気を測定するその他の方法を参照している。

2.4 付属書 1 では、¶ 12.7 の表 1 に示す帯電の最大推奨レベルを決定する方法について説明し、SEMI E78 にある基本となる方法、およびこのガイドと SEMI E129 の推奨を整合させる更新情報の両方を含んでいる。

注 1: この文書の関連情報 1 には静電気的な異物吸着の理論的な検討、過去に遭遇した静電気問題とそれらをいかに解決したかというユーザと装置製造業者からの事例を記載している。また、関連技術文書の文献リストが含まれている。関連情報 2 は、半導体製造設備でよく使用される静電気制御方法について説明する。静電気制御方法のさらに詳細な考察は、SEMI E129 に記載されている。関連情報 3 には、静電気両立性要求を半導体製造装置の購入文書に追加する場合の例が含まれている。関連情報 4 では、電界がレチクルに及ぼす危険性について考察する。改訂記録は、SEMI E78-0309 からこの文書にかけられた変更点を記述している。

2.5 製品やレチクルの保護あるいは EMI 制御について、ある領域の ESD リスクの尺度は、発生する ESD イベントの存在と性質によって定義される。

2.6 異物の静電気吸引 (ESA) を低減することによる汚染管理について、ある領域の静電気のリスクは静電気電荷の存在とレベルによって定義される。

2.7 レチクルの損傷については、危険性はレチクル上の静電気の変化またはレチクルの周囲の電界強度によって定義される。

2.8 半導体製造は、ミニエンバイロメントや製造装置内で行われることが多くなっている。静電気に関連した問題の多くは、その製品がキャリア内にある間、キャリアからの移載、または、製造装置により取り扱われる際に引き起こされる。

2.9 静電気の数々の制御方法は、静電気を許容レベル以下に制御するために装置設計に組み込むことができる。このガイドは、基本的には装置製造業者が装置設計を行う際に使用される。

2.10 静電気の制御方法の有効性を示すための試験方法がいくつかある（このガイドの § 6, § 7 参照）。エンドユーザは、装置の購入仕様で両立性を確認するために同じ試験方法を用いることができる。試験は、静電気測定分野の資格を得た人により行われるべきである。

2.11 半導体製造装置は異なった複数の装置によって供給されたモジュールを使用して組み立てられることが多くなっている。それぞれのモジュール製造業者が静電気の制御方法の有効性を示すために、このガイドの試験方法を使用すると同時に、エンドユーザにより同じ試験が完成したシステムに適用されることが推奨される。

2.12 装置設計に適用される静電気の制御方法は、半導体製造施設内の静電気に関連するすべての問題を解決するものではない。施設内の製品またはレチクルの輸送は静電気の影響を受け、静電気問題の原因となる。製造施設内で動き回る人も静電気の発生源となる。これらの施設の問題は SEMI E129 で述べている。

注意： このスタンダードおよび安全ガイドラインはその使用に関連した全ての安全上の問題を取り扱うことを意図していない。この文書の使用者は、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項を決定し、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 静電気測定 (Static Measurements) — 電荷、電界、電圧、接地間抵抗のような静電気量の測定を行うことは困難である。

3.1.1 対象物（絶縁体か導体）の性質、寸法形状、その周囲環境、測定器自体などは、静電気測定の精度に影響を及ぼすわずかな要因に過ぎない。

3.1.2 一般に、小さな移動可能な物体については、静電気の電荷を直接測定することは可能である。大きな物体や所定の位置に固定されている物体は、静電気起因する電界によって特性評価する必要がある。

3.1.3 同様に、静電気量の測定値を製品や装置に対する影響と関連づけることは困難である。

3.1.3.1 例えば、ESD シミュレータはコンデンサが既知の電圧で放電するときに標準化された放電波形を作る。この測定器は、半導体製品の ESD 損傷しきい値の決定や装置への ESD 影響を規定するために用いられる。

3.1.3.2 ESD シミュレータにより移動した電荷量 ($q = CV$, ここで q は電荷, C は静電容量, V は電圧) は既知であるが、発生した最大電流は不明である。電荷量が同じであっても、異なる静電容量と電圧が使用された場合には、同じ結果となる保証はない。

3.2 場所 (Location) — この静電気試験方法と製品、レチクル、キャリア上の静電気の最大推奨レベルは、製造装置のロードポート部に適用し、もし可能ならば装置内部での特性化にも適用する。この文書は、装置内でのいかなるプロセスにも影響を与えるものではない。

3.3 試験方法 (Test Method) — この文書の中で引用した試験方法は静電気レベルの測定精度を保証するものではない。この文書で推奨した最大静電気レベルには大きな公差がある (¶ 15.1 を参照)。

3.4 静電気制御 (Static Charge Control) — 半導体製造環境には静電気に関連したさまざまな問題が存在する。これらの問題は、広範囲の静電気問題と静電気問題に対するデバイスと装置の敏感性により、複雑となっている。このガイドには、一般的な推奨を含んでいる。この文書の使用者は、静電気に関連した特定の問題には、この文書で推奨しているものと異なる静電気レベルが必要か、異なる静電気レベルを許容するのかという点に注意する必要がある。

3.5 測定 (Measurements)

3.5.1 非常に高い静電位 (30,000 V 超) の測定 (Measurements of Very High Static Potentials (>30,000 V)) — 非常に高い静電位 (30,000 V 超) の測定は、メーター測定範囲の超過やメーターに対する ESD イベントを回避するために、十分距離を離して実施することが必要な場合がある。

3.5.2 物体の帯電電圧の測定精度は、物体のサイズ、物体からの距離、および被測定物体のすぐ近くの他の接地物体または帯電物の存在によって異なることがある。他の距離で実施する測定については、測定装置製造業者に問い合わせること。

3.5.3 移動物体または表面の測定 (Measurements on Moving Objects or Surfaces) — 移動物体または表面の静電気を測定するには正しい距離を保持し、接触を避けるように注意する必要がある。これにより、機械の損傷または身体の傷害のない「良好な」測定が保証される。

3.5.3.1 移動物体の測定には、物体が移動速度に対して十分速い応答時間をもつ測定装置を使用する必要がある。関連情報については測定装置製造業者に問い合わせること。

3.6 この文書は製品またはレチクル、あるいはそのキャリアを取り扱わないか、含まない半導体製造装置には適用されない。

4 参照スタンダードおよび文書

4.1 SEMI スタンダードおよび安全ガイドライン

SEMI E33 — Specification for Semiconductor Manufacturing Facility Electromagnetic Compatibility

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

SEMI E43 — Guide for Measuring Static Charge on Objects and Surfaces

SEMI E129 — Guide to Assess and Control Electrostatic Charge in a Semiconductor Manufacturing Facility

SEMI E163 — Guide for the Handling of Reticles and Other Extremely Electrostatic Sensitive (EES) Items Within Specially Designated Areas

4.2 ESD Association Standards and Advisories¹

ESDA/JEDEC JS-001 — ESDA/JEDEC Joint Standard for Electrostatic Discharge Sensitivity Testing – Human Body Model (HBM) – Component Level

ANSI ESD STM5.2 — Electrostatic Discharge Sensitivity Testing - Machine Model (MM) – Component Level

ANSI ESD STM5.3.1 — Electrostatic Discharge Sensitivity Testing – Charged Device Model (CDM) – Component Level

4.3 IEC Standard²

IEC 61000-4-2 — Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4.2: Testing and Measurement Techniques – Electrostatic Discharge Immunity Test

4.4 United States Military (MIL) Standard³

MIL-STD 883H — Department of Defense Test Method Standard: Microcircuits

4.5 JEDEC Documents⁴

ESDA/JEDEC JS-001 — ESDA/JEDEC Joint Standard for Electrostatic Discharge Sensitivity Testing – Human Body Model (HBM) – Component Level

JESD22-A115 — Electrostatic Discharge (ESD) Sensitivity Testing Machine Model (MM)

JESD22-C101 — Field-Induced Charged-Device Model Test Method for Electrostatic Discharge Withstand Thresholds of Microelectronic Components

4.6 その他の文書

ITRS 1999, 2002, 2011 — International Technology Roadmap for Semiconductors – ITRS⁵

White Paper 2: A Case for Lowering Component Level CDM ESD Specifications and Requirements⁶

注意： 別途指示のない場合、引用された全ての文書は最新版を指す。

5 用語

5.1 略語および頭字語

5.1.1 ANSI (American National Standards Institute) — 米国規格協会

¹ Electrostatic Discharge Association, 7900 Turin Road, Building 3, Rome, NY 13440-2069, USA; Telephone: +1.315.339.6937, Fax: +1.315.339.6793, <http://www.esda.org>

² International Electrotechnical Commission, 3 rue de Varembe, Case Postale 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland; Telephone: +41.22.919.02.11, Fax: +41.22.919.03.00, <http://www.iec.ch>

³ United States Military Standards, Available through <http://www.everyspec.com>

⁴ Joint Electron Device Engineering Council, 3103 North 10th Street, Suite 240-S, Arlington, VA 22201, USA; Telephone: +1.703.907.7560, Fax: +1.703.907.7583, <http://www.jedec.org>

⁵ ITRS Global Communication Center, SEMATECH, 2706 Montopolis Drive, Austin, TX 78741, USA; <http://public.itrs.net>

⁶ Electrostatic Discharge Association, 7900 Turin Road, Building 3, Rome, NY 13440-2069, USA; Telephone: 315.339.6937, Fax: 315.339.6793, <http://www.esda.org/documents/industrycouncilwhitepaper.pdf>

- 5.1.2 CDM (*Charged Device Model*) — デバイス帯電モデル
- 5.1.3 COO (*Cost of Ownership*) — コストオブオーナーシップ
- 5.1.4 EC (*European Commission*) — 欧州委員会
- 5.1.5 EMI (*Electromagnetic Interference*) — 電磁妨害・電磁干渉
- 5.1.6 ESA (*Electrostatic Attraction*) — 静電気吸着
- 5.1.7 ESD (*Electrostatic Discharge*) — 静電気放電
- 5.1.8 HBM (*Human Body Model*) — 人体モデル
- 5.1.9 IC (*Integrated Circuit*) — 集積回路
- 5.1.10 IEC (*International Electrotechnical Commission*) — 国際電気標準会議
- 5.1.11 ISO (*International Standards Organization*) — 国際標準化機構
- 5.1.12 ITRS (*International Technology Roadmap for Semiconductors*) — 国際半導体技術ロードマップ
- 5.1.13 JEDEC (*Joint Electron Devices Engineering Council*) — 半導体技術協会
- 5.1.14 MIL-STD (*U. S. Military Standard*) — 米軍規格
- 5.1.15 MM (*Machine Model*) — マシンモデル
- 5.1.16 RH (*relative humidity*) — 相対湿度

5.2 定義

5.2.1 キャリア (*carrier*) — 半導体製造のさまざまな処理段階でウェーハ、ダイ、パッケージされた集積回路、レチクルを保持するために使用されるデバイスのこと。

5.2.2 堆積率 (*deposition rate*) — 表面境界層に隣接した微粒子濃度で割った表面への微粒子流れ。(単位面積と単位時間当たりの微粒子堆積数)。堆積速度 (*deposition velocity*) と呼ばれることもある。

5.2.3 電磁干渉 (*EMI : electromagnetic interference*) — 外部からの電磁誘導または電磁放射によって電子装置の実効性能や運用効率を低下させる電磁的干渉のこと。

5.2.4 静電気吸引 (ESA : *electrostatic attraction*) — 逆極性に帯電した2つ以上の物体間に作用する力。

注2: 結果的に、帯電した表面への微粒子の堆積速度や帯電した物質の移動度が増加する。

5.2.5 静電的な両立性 (*electrostatic compatibility*) — 製品の生産、および静電気問題を発生させずに製品、レチクルおよびキャリアの設備間輸送を可能にするための適切な電荷制御のこと。[SEMI E129]

5.2.6 静電気放電 (ESD : *electrostatic discharge*) — 高電界によって誘起された、急速で突発的な静電気電荷の移動のこと。

注3: 通常、電荷は静電電位の異なる二物体間を火花放電により流れる。

5.2.7 装置の静電気レベル (*equipment electrostatic levels*) — 製品とレチクルの外形サイズの主要技術ノードに関連する、許容可能な静電気レベル。

5.2.8 ESD シミュレータ (*ESD simulator*) — 製品または装置の一部に直接放電したとき、特定の静電気放電電流波形を提供する装置。

5.2.9 ロードポート (*input and exit ports*) — 製品や製品キャリアが処理のためにその装置に入れるために置かれる場所、または処理後にその装置から搬出される場所。

5.2.10 ミニエンバイロメント (*minienvironments*) — 汚染や人間から製品を隔離するために囲いを設けてつくられた、密閉容器によって作り出された小さな局所に限定された環境。[SEMI E45]

5.2.11 製品 (*product*) — 機能的な半導体デバイスとなることを意図したユニット。これは、機能的なエンジニアリング装置を含む。

5.2.12 耐電圧 (*withstand voltage*) — 集積回路 (IC) の静電気放電試験の間、デバイスの故障が起こらない最も高い電圧ストレス

5.3 記号

5.3.1 *A* — ampere

5.3.2 *C* — capacitance

5.3.3 *C* — coulomb

5.3.4 *cm* — centimeter

5.3.5 *m* — meter

5.3.6 μm — micrometer or micron

5.3.7 *mm* — millimeter

5.3.8 *N/A* — particle burden added to a wafer (number of particles per unit area) ウェーハ上に堆積する異物の質量, 単位面積当たりの微粒子の数)

5.3.9 *nC* — nanocoulomb

5.3.10 *nm* — nanometer

5.3.11 *ns* — nanosecond

5.3.12 Ω — ohm

5.3.13 *pF* — picofarad

5.3.14 *ps* — picosecond

5.3.15 *q* — charge

5.3.16 *s* — second

5.3.17 *V* — voltage or volts

6 要求事項

6.1 以下の項は、製品、レチクル、または装置の ESD による損傷しきい値を規定するのに使用できる試験方法を含む。製造プロセス中の製品、レチクル、および装置に発生する静電気と静電気電界のレベルを決定するための試験方法も含む。

6.2 製品、レチクル、および装置の実際の ESD 敏感性レベルを決定するための代替方法として、エンドユーザは製造プロセスの年と技術ノードに基づいて要求事項を規定することができる。許容可能な装置の静電気 (static charge) レベルの推奨値を¶ 12.7 の表 1 に示す。

6.3 測定方法と測定器 (*Measurement Methods and Instrumentation*) — 静電気の「安全」レベルを決定することができる単一の試験方法は存在しない。静電気電荷量、物体上の電荷分布、静電気放電の性質は帯電レベルが安全であるかどうかを決める際に相互に影響する。

6.3.1 静電気に関連した問題が完全に排除されたということを保証 (*guarantee*) するレベルを決定することは困難であろう。

6.3.2 このガイドに記載した測定方法は、プロセス装置に問題を引き起こしやすい帯電または電界レベルをユーザが識別するのに役立つ。これらによって、ユーザは帯電および電界レベルの制御に使用する方法の有効性を評価することができる。

6.4 ESD 損傷の試験 (Test for ESD Damage)

6.4.1 ESD による対象物（すなわち製品、レチクル、装置）への直接的な損傷を検討するとき、重要なパラメータは、対象物への、または対象物からの電荷移動に伴う電流である。試験パラメータの固定した組み合わせ条件下では、対象物へ／からの電荷移動による損傷の電流量を決定できる。

6.4.2 パッケージされたデバイスをテストする場合は、様々な型式の ESD シミュレータがこの目的のために使用される。デバイスのテストの詳細については、§ 4 に挙げた ESDA/JEDEC JS-001, ANSI/ESD S5.2, および ANSI/ESD S5.3.1, JESD22-A115 および JESD22-C101, または MIL-STD 883H 規格を参照のこと。

6.4.2.1 上記の業界標準では、デバイスを損傷させずに放電できる最大ピン電圧によってパッケージデバイスの ESD 感性を表す。パッケージデバイスは製造装置によって取り扱われるため、適切な測定器でピン電圧の測定が可能である。

6.4.3 ウェーハ、レチクル、パッケージされていない半導体デバイスをテストする ESD シミュレータのための確立されたスタンダードはない。これらの項目の ESD 損傷しきい値は、パッケージされたデバイスのものとは大きく異なる可能性がある。

6.4.4 適切な ESD シミュレータを使用して製品の損傷電流レベルが決定されると（使用するスタンダードにより）、ESD シミュレータの動作パラメータに対応する電荷量が示される。

6.4.5 エンドユーザは、製造装置の特定な個所で取り扱われる製品あるいはレチクルへの電荷移動による損傷電流レベルを決めなければならない。

6.5 静電気の測定 (Measuring Static Charge) — 製造装置に関しては、製品と製品に直接接触する可能性のあるキャリア、その他の物体の電荷量（帯電量）を知ることは明らかに重要である。

6.5.1 電荷は、クーロン単位 (C) で測定されるか、より実際に近い nanocoulombs ($\text{nC} = 10^{-9} \text{ coulombs}$) 単位で測定される。電荷測定は、絶縁された導体（人体を含む）または小さな移動物体に対して、§ 7, 図 1 に示すファラディカップや SEMI E43 に記載されている電量計を使用して行う。

6.5.2 これらの測定方法は、直接的な ESD イベントから製品またはレチクルに危険を及ぼす種々の物体の帯電レベルを明確にするために使用できる。

6.5.3 集積回路のような帯電物はファラディカップ内に置き、その帯電電荷量が読み取れる。ウェーハ、キャリアや他の装置部品には十分に大きい「カップ」の付いた測定器を用意する必要がある。また、この対象物の帯電レベルを変えずに、対象物をそのカップに入れることが必要である。これらの測定を行うために必要な、より詳細な情報は測定器の製造業者から入手すること。

6.5.4 ユーザは、ESD シミュレータを用いてどの ESD レベルが製品やレチクルに損傷を引き起こすか決めること。

6.5.5 装置動作によって製品、キャリア、装置部品に、許容できるよりも大きな帯電量が発生しないことを証明することは装置製造業者の責任となるであろう。これは§ 7 の図 2 に示される。

6.6 電界測定 (Measuring Electric Field) — 固定された大きな対象物や絶縁体の場合、電界測定は、損傷を起こすような ESD イベントが発生するかどうかを予測する上では、それほど役に立たない。クーロンメータを使用して簡単に測定できない対象物については、クーロンメータによる測定ほど定量的でないが、静電気電界測定により ESD の脅威を評価できる可能性がある。

6.7 電圧測定 (Measuring Voltage) — パッケージデバイスのピンの電圧は、接触電位計を使用して直接測定できる。個々のピンの静電容量は一般に極めて小さく 1 pF 以下であるため、測定用の接触電圧計は適切な入力インピーダンスを持っていないといけない。パッケージデバイスのピンからの放電を避けるには、一般に $10^{14} \Omega$ 以上の抵抗値と 10^{-2} pF 未満の静電容量が必要である。

6.8 誘導電荷分離によって引き起こされる ESD 損傷の試験 (Testing for ESD Damage Caused by Induced Charge Separation)

6.8.1 物体上の電荷分離により ESD 損傷が発生することがある。製品（例：エポキシパッケージ）やレチクル（例：石英基板）の一部が帯電し、製品（例：リードピン）やレチクル（例：クロムトレース）の別の部分で電荷分離を誘導（induce）することがある。リードピンやクロムトレースを接地面の十分近い場所に置か、接地面に接触させた場合、ESD が発生することがある。

6.8.1.1 エンドユーザは、電荷量計やファラディカップを使用して SEMI E43 の方法で製品またはレチクルを試験し、接地面との接触により ESD 損傷が発生する静電気レベルを決定する必要がある。

6.8.2 他の場合として、製品やレチクルは帯電した別の物体の近傍で取り扱われることがある。この帯電した物体による電界が、製品やレチクルに電荷を誘導し、電界が存在する状態で製品やレチクルが接地面に近づくか接触すると ESD が発生することがある。

6.8.2.1 エンドユーザは、静電気電界計や静電気電圧計を使用して SEMI E43 の方法で製品やレチクルをテストし、接地面と接触している場合に ESD 損傷が発生させる、静電気電荷による電界の許容レベルを決定しなければならない。

6.8.3 静電気電界および電界の変化のいずれもが、レチクルが接地された部分と接触しなくても ESD による損傷を引き起こすことが知られている。

6.8.3.1 静電気電界は、レチクルまたはそのパッケージを取り扱っている時に帯電すると発生する。帯電による電界の変化は、レチクルの近傍の物体が帯電したとき、レチクルと帯電した物体が相対的に動いているとき、または接地条件により帯電した物体とレチクルの間の電界が変化したときに（例えば、ロボットによる取り扱い等の理由）、レチクルに発生することがある。

6.8.4 レチクルを生成するか、扱う装置では、帯電した物体による電界をレチクルに ESD 損傷が発生させないレベルに制限する必要がある。電界の試験方法は SEMI E43 に記載されている。現在のところレチクルの電界に対する感度を決定するための業界の標準はないが、試験方法は存在する。

注 4: 関連情報 2 および 4 を参照のこと。

6.8.5 ESD イベントが発生しないのに、レチクルが電界によって損傷する形跡がある。レチクルおよびその他の超静電気敏感性アイテムに関する情報は、SEMI E163 に含まれる。

注 5: 関連情報 4 を参照のこと。

6.8.6 最後に、ゲート酸化膜が薄くなるにつれて、ウェーハ表面に静電気電荷が存在することが ESD の危険性につながるという事例が増えつつある。将来は、前工程半導体製造において ESD に関連したゲート酸化膜の損傷を防ぐために、ウェーハ表面の許容可能な静電気電荷をさらに制限しなければならない可能性がある。この分野についてはさらに研究が必要である。

6.9 微粒子の静電気吸引の試験 (Testing for Electrostatic Particle Attraction)

6.9.1 対象物の表面電荷による静電気電界によって微粒子の静電気吸引 (ESA) が発生することがある。

6.9.1.1 電界強度と、一般的には低い度合いであるがその静電気電界の広がりの方が静電的に微粒子堆積率（しばしば微粒子堆積速度とも呼ばれる）に影響する。また、静電気による微粒子堆積速度は、微粒子サイズと微粒子の帯電電荷量に依存する。

6.9.1.2 制御された研究室条件でも、電界強度、微粒子サイズの分布、特に微粒子帯電電荷量等の測定は難しい。これらの 3 つのパラメータについて電界測定が、最も適切な手段と思われる。

6.9.2 静電気電界の測定は一般的に静電気電界計で行うことができる。静電気電界の単位は、volts/m（あるいは volts/cm あるいは volts/inch）。一般的に、25.4 mm (1 in.) の距離で測定される。

6.9.2.1 測定中の機器の存在が電界特性を変えることで実際の静電気電界のレベルを変化させてしまうので正確な測定は難しい。これは§ 7 の図 3 で示される。SEMI E43 には、静電気電界計を使う測定技術と静電気電圧計を使う代替の測定技術が記述されている。

6.9.3 静電気による微粒子堆積率は電界、微粒子サイズ、微粒子帯電電荷量にのみ依存する。しかし、表面上に堆積する微粒子数は、装置エリア内の微粒子濃度と、微粒子堆積が起きている露出時間の長さに依存する。

6.9.3.1 また、重力沈降と拡散のような静電気による堆積以外のメカニズムも微粒子の堆積に寄与する。これら非静電氣的メカニズムによって堆積する微粒子数は、装置周囲の微粒子濃度と露出時間によって変化する。

6.9.3.2 静電気による微粒子堆積率とその他の堆積メカニズムに関連した微粒子堆積率との比較は、微粒子堆積の観点から許容静電気電界のしきい値を決定するための鍵となる。付属書 1 の§ A1-2.5 の中で示された比較が、静電気電界の許容値を評価するための基盤である。

6.9.3.3 ユーザと装置製造業者は、周囲の微粒子サイズとその濃度、および製品の露出時間を決定して合意すること。

注 6: 微粒子の堆積に影響する静電気電界の許容値に関する追加情報は、関連情報 1 の§ R1-2 に記載されている。

6.9.4 § 7 と SEMI E43 の測定方法を使用して、この文書の要求を満たす、製品、レチクル、装置表面の電界を決定できる。

6.10 装置 ESD (Equipment ESD)

6.10.1 装置の ESD 耐性は、製品やレチクルの損傷に直結する耐性よりは、かなり高いレベルで確立されている。¶ 12.7 の表 1 に示す静電気電荷の制限値を使用して製品やレチクルを保護すれば、装置に対する十分な保護となる。

6.10.2 装置 ESD に対する耐性は、一般に、European Commission (EC) 準拠の IEC 61000-4-2 を含む多数の国際標準や、SEMI E33 のガイドラインで扱っている。

6.10.3 測定は、これらの標準に記載される ESD シミュレータを使用して実施される。

注 7: ESD に関連する EMI 問題のさらなる考察は、SEMI E129 の関連情報 3 に記載されている。

7 装置

7.1 ESD による損傷 (ESD Damage) — 製品の ESD 損傷しきい値を決定する装置は用いられた試験方法に依存する。追加情報は§ 4 を参照のこと。製品、レチクル、あるいはキャリア上に発生した電荷量を測定するためのファラディカップ試験方法を図 1 に示す。本試験方法の追加情報その他については、SEMI E43 に含まれる。

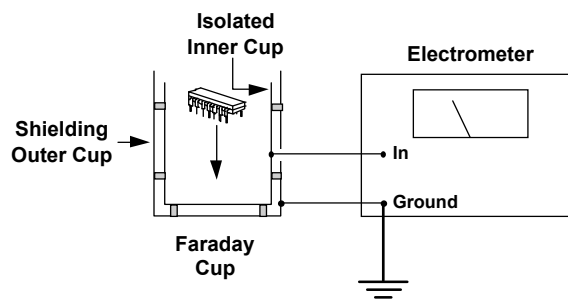


図 1
ファラディカップによる電荷測定

7.1.1 絶縁物は、同時に両極性に静電気帯電することができる。ファラディカップによる測定は、各極性に分かれた量ではなく、実行電荷を示す。静電気電界計または静電気電圧計を使用してこの条件が存在するかどうかを判断する。

7.1.2 製品損傷のための ESD シミュレーション試験とファラディカップを用いた電荷測定値の関係を図 2 に示す。

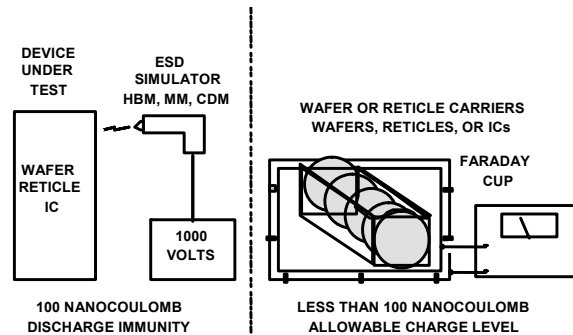


図 2
ESD 損傷試験

7.2 静電気電界測定に使用される測定器は、静電気電界計（Electrostatic field meter）として知られている。この取扱説明書は、測定器製造元から入手するか、SEMI E43 に記載されている。

7.2.1 図 3 に示す測定環境は、その測定に関する機器の影響を示している。ほとんどの場合、その静電気電界計の存在により帯電物表面からの電束と電気力線の集中の両方が増加する。静電気電界計を使うと一般にその静電気電界計がない状態よりも高い電界値を示す。

7.3 静電気電圧計は電界計による測定の代わりに使用することができる。小さい物体や表面エリアには、静電気電圧計が適している。

7.3.1 適切な条件の下では、静電気電圧計は帯電物からの距離に関係なく高い精度と再現性を示す。静電気電圧計のプロブは、弧絡が発生することなく帯電した表面の近くに置くことができ、小さい帯電物による電界を分析することができる。

7.4 高インピーダンス接触電圧計（抵抗値 $>10^{14} \Omega$ 、静電容量 $<10^{-2} \text{ pF}$ ）を使用して、パッケージデバイスのピン電圧を直接測定できる。高インピーダンスであっても、できるだけ素早く測定してデバイスピンからの放電を避け、静電気電荷によってピンに生じる電圧が実際より低く測定されないようにする。パッケージデバイスは製造装置で取り扱われるため、そのピンで測定された電圧を、パッケージデバイスの ESD 感性性を定めるための ESD シミュレーション試験に使用する電圧と比較できる。¶ 6.4.2 を参照。

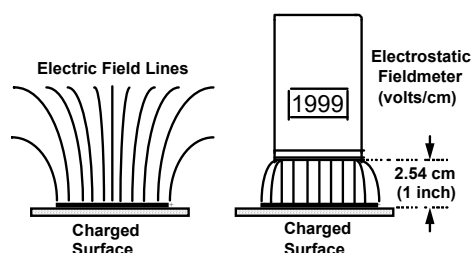


図 3
静電気電界測定

8 安全注意事項

8.1 人体 (Personnel) — 半導体製造プロセスによっては、静電気電荷は危険な状態を作り出すことがある。

8.1.1 高速装置での製品のつまりや破損により引き起こされる ESA や ESD イベントは、人体に対しても危険を及ぼす可能性がある。

8.1.2 可燃性や爆発性のある薬品やガスを使う領域では、火花を発生する ESD イベントを防止しなければならない。

8.1.3 ESD イベントは、通常は人体に対しては無害であるが、無用な反射や「驚愕」反応を起こすことがある。この反射により、特に可動装置のある領域内や危険な薬品を使用している領域内にいる人を危険な状態にすることがある。

8.1.4 ESD イベントによる EMI は、ロボットまたは他の移動装置の予測不能な誤動作の原因となり、人に危険を及ぼす可能性がある。

8.1.5 これらの人に及ぼす危険を最小にするには、装置内で使用されている静電気電荷管理方法を超える追加の管理方法を適用する必要があることがある。

8.2 測定の安全 (Measurement Safety) — 製造装置内の可動領域内や静電気電位が 30,000 V を超えることがある非接地の導体がある領域内で静電気電荷測定を実施するときは、ユーザは注意しなければならない。測定の安全に関するその他の考慮事項については、SEMI E43 を参照すること。

9 試験試料

9.1 下記は、実施される試験についての推奨事項である。ユーザと装置製造業者はこれらの推奨事項に合意し文書化しなければならない。

9.2 静電気電荷量 (nC で表す) の測定は、ファラディカップ法でナノクーロンメータ (nanocoulombmeter) を使用して実施されなければならない。

9.3 静電気電界 (volts/m, volts/cm, または volts/inch で示す) または静電気電圧 (volt で示す) の測定は、それぞれ静電気電界計、または静電気電位計を使用して実施されなければならない。パッケージデバイスのピンの電圧測定は、高インピーダンス電位計による接触方法で行われる場合がある。

9.4 ユーザと装置製造業者は、試験を誰が実施するかを合意しなくてはならない。合意に先立って、装置製造業者は第三者による製造装置の測定を考慮してもよい。

9.5 試験サンプルは、実際の使用条件の下で装置が扱う材料を選定すること。例えば、絶縁されたウェーハでの試験と導電性ウェーハでの試験は、きわめて異なる結果を示すことがある。

9.6 測定は、装置で扱われるであろう絶縁性もしくは導電性ウェーハ、レチクル、パッケージデバイス、またはキャリアの最低 10 サンプルについて実施しなければならない。また、この測定は、装置で取り扱われる一つのサンプルを用いて最低 10 回の連続的な試験サイクルで実施してもよい。

9.6.1 静電気測定は、各試験サンプルに対して行わなければならない。静電気電界測定は、各試験サンプルの複数個所で行うか、装置のロードポートで行わなければならない。測定対象が小さい場合の測定要件については、SEMI E43 を参照すること。

9.6.2 各試験サンプルの平均電荷量、静電気電界、静電気電圧測定値、または装置ポートにおける静電気電界、または電圧測定値は、¶ 12.7 表 1 の推奨値を満たさなければならない。また、個々の測定値は、表の該当値の 2 倍を越えないものとする。測定値の標準誤差も報告すること。

9.7 ユーザや装置製造業者は、試験前、または試験中の運転履歴 (例: ウォームアップ時間、キャリアの型、処理する製品数、運転速度) に合意し、文書化しなければならない。

9.8 ユーザや装置製造業者は、すべての適切な環境条件（例：温度、相対湿度[RH]、露点、空気流量）に合意して文書化しなければならない。

注 8: § 12 にユーザと装置製造業者間の交渉前の試験条件に関するガイドラインを記載している。

10 装置およびサンプルの準備

10.1 実施される試験方法により、装置の準備のための適切な試験方法に関する文書を調べる。追加情報は § 4 を参照のこと。

11 校正と標準化

11.1 実施される試験方法により、校正と検証のための適切な試験方法に関する文書を参照する。追加情報は § 4 を参照のこと。

12 手順

12.1 エンドユーザは、製品とレチクルの形状に基づいた ¶ 12.7 の表 1 に記載されている許容可能な静電気レベル、または静電気電界の推奨事項に従ってもよい。詳細については、付属書 1 を参照すること。

12.2 装置製造業者は、製品、レチクル、あるいは装置の表面に損傷を与えるほどの静電気または静電気電界が生じないように装置設計を行う。装置製造業者は、自社の装置が製品および ¶ 12.7 表 1 に示すレチクル形状に基づく、許容静電気レベルまたは許容静電気電界レベルの推奨値を満たすことを確認するため、§ 9 および次の ¶¶ 12.4–12.5 で示す試験方法を用いることができる。

12.3 あるいはその代わりに、エンドユーザによって、製品やレチクルが損傷しない静電気放電や静電気電界の耐性レベルを決定することもできる。

12.3.1 集積回路の測定方法は、§ 4 に記載した文書に記述している。

12.3.2 ウェーハ、レチクル、その他のアイテムへの ESD 損傷の適切な測定方法は、§ 4 の文書に記載された試験方法の中で使われた機器を応用するとよい。付属書 § A1-2.1 から § A1-2.4 は、ESD 損傷を低減するために許容される静電気レベルを選択するための追加情報を含んでいる。

注 9: 関連情報 1 の § R1-1 は、ESD 損傷を低減するために許容される静電気レベルを選択するための追加情報を含んでいる。

12.3.3 エンドユーザは、装置の製造業者、レチクルのサプライヤと共同して処理中の周囲の微粒子レベル、製品曝露時間、電界に起因するレチクルの損傷レベルを決定しなければならない。付属書 § A1-2.5 には、微粒子の ESA を低減する適切な静電気電界レベルを選択するための情報が含まれている。

注 10: 関連情報 1 の § R1-2 には、微粒子の静電気吸着を低減する適切な静電気電界レベルを選択するための情報が含まれている。

12.4 ESD による損傷 (ESD Damage)

12.4.1 ESD 損傷のしきい値測定は、クーロン (C) 単位、またはより実際に近い nanocoulomb (nC = 10^{-9} C) の単位で行う。

12.4.2 ファラディカップ測定方法を使用して製品、製品キャリア、装置部分の静電気電荷レベルを決定する。それぞれのアイテムは、電荷レベルが変化しない方法でファラディカップのところへ搬送しなければならない。これを実施するための推奨事項については、測定装置の製造元の取扱説明書を参照のこと。

12.4.3 パッケージデバイスは製造装置で取り扱われるため、高インピーダンス接触電圧計を使用してピン電圧を測定してよい。特に、ピンが装置内の導電性表面に接触する直前の位置については注意が必要である。電圧は、業界標準のデバイス試験で測定された電圧敏感性レベルと比較できる。¶ 6.4.2 を参照のこと。与えられた電圧レベルでの装置内放電量を、ESD シミュレータで管理された環境における同じ

電圧レベルでの放電量ほど厳しくすることはできないかもしれない。この件に関する詳細については、米国 ESD 協会の Industry Council が発行する ESD 目標レベルに関する White Paper 2 を参照のこと。

12.4.4 製品、キャリア、材料の測定は、通常の製造条件で取り扱われた製品の有意な量の後に装置のロードポートで行うこと。

12.4.5 測定は、製品、キャリアが試験中の装置での通常の処理を経た後に行うこと。選択された静電気レベルに準拠していることを検証するには、一般的には 5 回の測定で十分である。§ 13 を参照すること。

12.4.6 測定は、装置が通常の動作モード（例えば 2 時間以後）の中で安定した後の連続した 2 日間で行うこと。試験期間中に装置構成（ハードウェアおよびソフトウェア）を変更しないこと。

12.5 静電気電界 (Electrostatic Field)

12.5.1 静電気電界の測定値は、volts/m (volts/cm, または volts/inch) で表される。25.4 mm (1 in.) の距離か、または測定器メーカーの指定のとおり、測定すべきである。

12.5.2 静電気電界の測定は、少なくとも ESD に敏感なアイテムの 30.5 cm (12 in.) 以内に接近する設備内のすべての表面について実施しなければならない。測定する代表的な面は、製品、レチクル、キャリア、ロボット、装置表面が含まれる。

12.5.3 測定は、すべてのアイテムについて 5 つの異なる場所で行う必要がある。測定場所は、測定装置と測定場所の間の距離の約 3 倍離れていなければならない。25.4 mm (1 in.) のところで測定するほとんどの静電気電界計については、離す距離は 76.2 mm (3 in.) となる。測定に関するその他の情報、および静電気電圧計を使用する代替測定技術については SEMI E43 を参照のこと。

12.5.4 製品、レチクル、キャリア、材料の測定は、有意な量の製品、またはレチクルを通常の製造条件で流動後に装置のロードポートで行うこと。

12.5.5 測定は、製品、レチクル、キャリアが試験中の装置での通常の処理を経た後に行うこと。選択された静電気レベルに準拠していることを検証するには、一般的には各場所につき 5 回の測定で十分である。

12.5.6 測定は、装置が通常の動作モード（例えば 2 時間以後）の中で安定した後の連続した 2 日間で行うこと。試験時間中に装置構成を変更しないこと。

12.6 SEMI E129 勧告 (SEMI E129 Recommendations)

12.6.1 SEMI E129, ¶ 12.7 の表 1 は、静電気に起因する問題を防止するための最大帯電レベルの推奨値を含んでいる。

12.6.2 これらのレベルは、建築資材、備品、人体、製品、レチクル、キャリア、搬送および包装材料など、半導体工場内のすべての要素に適用される。これらのレベルは工場内の装置にも適用される。

12.6.3 この文書は、SEMI E129 での推奨帯電レベルと一致し、国際半導体技術ロードマップ (ITRS) がマッピングしている主要な技術の変化に同調することが望ましい。

12.7 表 1 では許容可能な装置の静電気レベルの推奨値を挙げ、ITRS 2011 の主要な技術ノードに対応して示しているが、これらはウェーハの形状サイズに関連するものである。帯電電圧に起因した問題からの保護のためには、半導体製造設備は表 1 に示した次の帯電レベルに一致させるべきであろう。

12.7.1 静電気の制御方法の使用に際しては多くの決定を行わなければならない、これらの方法を装置に恒久的に実装することになるので、許容可能な静電気レベルを選択する際、ユーザが製造プロセスでの装置の耐用年数について考慮したいと考えても不思議ではない。

注 11: 例えば、装置のスタートアップ時には 90 nm の寸法形状で処理し、28 nm の寸法形状まで小さくして使用できるようにする。装置は、28 nm の使用に推奨される限界値に対して設計されるべきである。

表 1 装置の推奨 管理帯電レベル (Recommended Equipment Electrostatic Levels)

年 ノード	ウェーハおよびレチクル 静電気放電, nC	10 pF デバイス 静電気放電, nC	10 pF パッケージデバイス 静電気放電, V	静電気電界,		
				V/cm	V/m	(V/inch)
2000 180 nm	10.0	2.5~10	250~1,000	200	20,000	(500)
2004 90 nm	10.0	1.0	100	100	10,000	(250)
2010 45 nm	2.5	0.25	25	50	5,000	(125)
2011 36 nm	1.8	0.18	18	41	4,100	(105)
2013 28 nm	1.1	0.11	11	31	3,100	(78)
2015 23 nm	0.74	0.074	7.4	26	2,600	(65)
2017 17.9 nm	0.45	0.045	4.5	20	2,000	(50)
2019 14.2 nm	0.27	0.027	2.7	16	1,600	(41)
2021 11.3 nm	0.18	0.018	1.8	12	1,200	(30)
2023 8.9 nm	0.12	0.012	1.2	8.9	890	(23)

12.7.2 表 1 のレベルでは、装置がシリコン型半導体を加工処理することを前提としている。特殊な部品に使用する装置は異なるレベルを使用することが必要な場合がある。

注 12: 例えば、ガリウムヒ素半導体のプロセス装置、磁気抵抗(MR)ディスク読み取りヘッド、汚染による大幅な損失がある装置などである。

12.8 表 1 にリスト表示されたレベルは、動作条件の分析や稼働中の半導体製造設備での実験結果として決定されている。これらのレベルの正当性については付属書 1 に記載されている。

12.9 特定の装置条件や特定のデバイスについては、他のレベルが適切である可能性がある。

13 計算結果

13.1 5 回連続の測定値の平均は推奨レベルを超えてはならない。

13.2 いずれの測定値も推奨レベルの 2 倍を超えてはならない。

14 結果報告

14.1 データの記録には、次の情報が記載されていなければならない。

- 型式や製造番号を含む被試験装置の説明
- 装置の稼働条件および環境の説明
- 測定手順の説明
- 測定装置および最終校正日
- 測定対象物および測定場所の説明
- 測定場所の相対湿度(RH)と温度

- 測定結果
- 測定実施者
- その他、関連するコメント

15 試験方法の正確性と精度

15.1 この文書で述べている試験方法は、静電気電荷レベルの測定精度を保証するものではない。同様に、この文書で推奨される最大静電気電荷レベルは、厳密な要求条件として記載されているわけではない。

15.2 すべての測定装置において約 $\pm 20\%$ の精度が許容される。低い静電気電荷レベルやより精度の高い測定については、他の測定器や試験方法が必要になる可能性がある。

15.3 低レベルの電界強度や対象物の電圧を評価するには、必要な分解能と精度を備えた静電気電界計や静電気電圧計を使用すること。