

SEMI M40-1109

シリコンウェーハ表面のラフネス測定のガイド

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 2009 年 9 月 4 日、global Audits and Reviews Subcommittee にて発行が承認された。2009 年 10 月に www.semi.org で、そして 2009 年 11 月に CD-ROM で入手可能となる。初版は 2000 年 2 月に発行された。

1 目的

1.1 このガイドは、シリコンウェーハの表面ラフネスの特徴を調べ、報告するのに使用する測定方法を規定する手順を記述する。それは、さらに他のタイプの平面ウェーハ材料にも適用できる。SEMI M1 に規定されているようなシリコンウェーハの研磨された表面のラフネスは一般にマイクロラフネス領域にあることに注意をすべきである。

1.2 このガイドは、3 つの重要な方法を使用するラフネスの決定に関する用語および手順を提供する。

1.2.1 標準化走査箇所パターン

1.2.2 ラフネスの略語

1.2.3 特定のラフネス測定の識別に関する参考試験方法

2 範囲

2.1 このガイドは、次の方法を取り入れる。

2.1.1 標準化走査パターンを局部および前面の表面特徴付けに関して取り入れる。

2.1.2 短縮形の符号で測定条件を記述する 1 セットのラフネス略語

2.1.3 一般的な 3 種類のラフネス計器用の参考試験方法。これらの一般カテゴリは下記を含むがこれらに限らない。

- プロフィロメーター — AFM および他の走査プローブ顕微鏡、光学的プロフィロメーター、高分解能機械的スタイラスシステム
- 干渉計 — 顕微干渉計
- 散乱計 — 散乱計 (TIS)、角度分解光散乱計 (ARLS)、走査型表面検査システム (SSIS)

2.2 表面のラフネスの代表的な値を得る手順が規定されている。

2.3 ラフネスに関する用語は、使用するラフネス測定およびその結果の識別において曖昧さを除去するように意図している。

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 このガイドは、ウェーハ端面の測定には適用しない。

3.2 このガイドは、空間波長が 10 nm 以下の場合には適用しない。

3.3 このガイドは、特定のラフネスパラメータを定義することを意図していない、これらは他のスタンダードに記載してある。

3.4 測定装置の帯域幅および使用される帯域幅は、ラフネス測定の結果に厳しい影響を及ぼす。

- 3.4.1 2つの計測器間では、使用する帯域幅の違い(長短の差)によって、著しく異なる結果を生じる。
- 3.4.2 このガイドの表1の中でリストアップされた符号は、計器伝達関数を識別しない。
- 3.5 フィルムが存在すると光散乱測定に影響を与える。

4 考察

4.1 シリコンウェーハ表面ラフネスは、露出したシリコンウェーハに対して規定されることが多い¹。これらの仕様書は、最終研磨された表面およびウェーハ裏面のラフネスを扱っている。様々な技術がシリコンウェーハのラフネスを測定するために現在使用されている。これらの技術はAFM走査プローブ、機械的および光学的なプロファイリング、干渉顕微鏡および光(電磁放射)散乱を含む。機械的なプロファイリング技術は、他の工業でも広く使用され、十分にスタンダード化されている。プロファイリング技術は、一般にライン走査に限定され、したがって表面の非常に小さい部分だけの情報が得られるだけである。ラフネス測定のための干渉計測定技術にも同様の制限がある。しかし、光散乱技術はウェーハ表面全体を走査することができる。

4.2 歴史的にみて、プロファイリング技術用の様々なラフネスパラメータが発展しスタンダード化された。例えば実効ラフネス(R_q)および平均ラフネス(R_a)である。プロファイリング装置は表面のトポグラフィを測定し、一連の高さデータからラフネス統計値例えば R_q を引出す。光散乱技術は散乱の角度依存性から R_q を測定する、いくつかの光散乱システムはデータの解釈と推定によって他のパラメータを引出す。

4.3 ウェーハ表面または表面の大部分を代表するラフネス値は、単一点から得たデータに基くことができない。しかし、仕様は、ウェーハに対して単一の値を記述することが多い。したがって、この指針は、明確に説明し使用する走査箇所をスタンダード化したパターンを示し、かつ定義する。いくつかのタイプのラフネス変動、走査パターン、報告された結果の相互関係を記述するモデルが添付の関連情報に含まれており、ユーザがこれらの変数を規定し、解釈するのを支援する。

4.4 すべてのラフネス測定値に共通の特徴は使用した装置の帯域幅および伝達関数に、測定値が依存することである。さらに、高値または低値の空間周波数ソフトウェアフィルタが使用されるのが一般的で、報告する結果に影響を与えている。同じ表面でも2つの装置によって大幅に異なる数が報告される。この指針は、装置帯域幅および伝達関数を規定し、報告することに関する提案を含んでいる。

5 参照スタンダードおよび文書

5.1 SEMIスタンダード

SEMI E89 — Guide for Measurement System Analysis (MSA)

SEMI M1 — Specifications for Polished Single Crystal Silicon Wafers

SEMI M20 — Practice for Establishing a Wafer Coordinate System

SEMI M50 — Test Method for Determining Capture Rate and False Count Rate for Surface Scanning Inspection Systems by the Overlay Method

SEMI M52 — Guide for Specifying Scanning Surface Inspection Systems for Silicon Wafers for the 130 nm, 90 nm, 65 nm, and 45 nm Technology Generations

SEMI M53 — Practice for Calibrating Scanning Surface Inspection Systems Using Certified Depositions of Monodisperse Reference Spheres on Unpatterned Semiconductor Wafer Surfaces

SEMI M58 — Test Method for Evaluating DMA Based Particle Deposition Systems and Processes

SEMI M59 — Terminology for Silicon Technology

SEMI ME1392 — Guide for Angle Resolved Optical Scatter Measurements on Specular or Diffuse Surfaces

SEMI MF1048 — Test Method for Measuring the Effective Surface Roughness of Optical Components by Total Integrated Scattering

¹ In the SIA International Technology Roadmap for Semiconductors, available from the homepage of International SEMATECH;
<http://www.sematech.org>

SEMI MF1811 — Guide for Estimating the Power Spectral Density Function and Related Finish Parameters from Surface Profile Data

5.2 ASMEスタンダード²

ASME B46.1 — Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)

5.3 DINスタンダード³

DIN 4760 — Form Deviation, Waviness, Surface Roughness; System of Order, Terms and Definitions

DIN 4768 — Determination of Values of Surface Roughness Parameters Ra, Rz, Rmax by Means of Electrical Contact (Stylus) Instruments; Terminology, Measuring Conditions

DIN 4777 — Metrology of Surfaces; Profile Filters for Electrical Contact Stylus Instruments; Phase-Corrected Filters

5.4 ISOスタンダード⁴

ISO 468 — Surface Roughness – Parameters, Their Values and General Rules for Specifying Requirements

ISO 1879 — Instrument for the Measurement of Surface Roughness by the Profile Method – Vocabulary

ISO 1880 — Instruments for the Measurement of Surface Roughness by the Profile Method – Contact (Stylus) Instruments of Progressive Profile Transformation – Profile Recording Instruments

ISO 3274 — Instruments for the Measurement of Surface Roughness by the Profile Method – Contact (Stylus) Instrument of Consecutive Profile Transformation – Contact Profile Meters, System M

ISO 4287/1 — Surface roughness – Terminology – Part 1: surface and its parameters

ISO 4288 — Rules and Procedures for the Measurement of Surface Roughness Using Stylus Instruments

5.5 JISスタンダード⁵

JIS B 0601 — Surface Roughness – Definitions and Designation

JIS B 0652 — Instruments for the Measurement of Surface Roughness by the Interferometric Method

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。

6 用語

6.1 この規定実施に含まれているシリコンウェーハ技術に使われる頭字語、術語、およびシンボルはSEMI M59に記載されている。

6.2 角度分散乱測定に関係した付加的な用語類はSEMI ME1392で議論される。

6.3 計器伝達関数、パワースペクトル密度関数、そして相関最終パラメータに関係した付加的な用語類はSEMI MF1811で議論される。

6.4 表面ラフネスの測定に関係した他の用語類はASME B46.1; DIN 4760; ISO 468, 1829, and 4287/1; and JIS B 0601に記載されている。

2 American Society of Mechanical Engineers, Three Park Avenue, New York, NY 10016-5990, USA. Telephone: 800.843.2763 (U.S./Canada), 95.800.843.2763 (Mexico), 973.882.1167 (outside North America); <http://www.asme.org>

(国内連絡先) 日本規格協会 〒107-0052 東京都港区赤坂 4-1-24 03-3583-8003

3 Deutsches Institut für Normung e.V., Available from Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstrasse 4-10, D-10787 Berlin, Germany; <http://www.din.de>

(国内連絡先) 日本規格協会 〒107-0052 東京都港区赤坂 4-1-24 03-3583-8003

4 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; <http://www.iso.ch>

(国内連絡先) 日本規格協会 〒107-0052 東京都港区赤坂 4-1-24 03-3583-8003

5 Japanese Industrial Standards, Available through the Japanese Standards Association, 1-24, Akasaka 4-Chome, Minato-ku, Tokyo 107-8440, Japan. Telephone: 81.3.3583.8005; Fax: 81.3.3586.2014; <http://www.jsa.or.jp>

(国内連絡先) 日本規格協会 〒107-0052 東京都港区赤坂 4-1-24 03-3583-8003

7 計器および能力

7.1 プロフィロメーター

7.1.1 AFMの高い空間周波数限界である機械的プロファイラは機械的チップの半径または直径によって近似され、光学のプロファイラはレーザースポットの強度プロファイルによって近似される。それらの応答関数は複雑になり、ある場合にはプローブおよび測定された表面が組み合わされて影響を及ぼす。そのような装置の高い空間周波数限界は、その限界から合理的に取除かれて、設定するか選択されなければならない。これは合理的な、比較可能な、反復可能な測定値を達成するため必要である。探針型計器の特性はDIN 4768 と DIN 4777, そしてISO 1880, ISO 3274, と ISO 4288 に記述されている。

7.2 干渉顕微鏡

7.2.1 これらの計器の高い空間周波数限界は、焦点光学によって、またはある場合には検出器配列の画素点スレーシングによって定義される。そのような装置の高い空間周波数限界は、その限界から合理的に取除かれて、設定するか選択されなければならない。これは合理的な、比較可能な、反復可能な測定値を達成するため必要である。このタイプの計器の解説はJIS B 0652を参照のこと。

7.3 散乱計器

7.3.1 散乱光強度とラフネスとの間に直接の関係があるのは、十分に滑らかな表面に限る。下に与えられたレイリー平滑表面基準は、滑らかな平面限界推定するために頻繁に使用される⁶。

$$\frac{1}{2} \left(\frac{4\pi a \cos \theta_i}{\lambda} \right)^2 \ll 1 \quad (1)$$

$$m \ll 1 \quad (2)$$

ここで、 m = プロフィールの傾斜、

λ = 入射光の波長、

a = サンプルプロフィールの振幅(ピークから谷までの高さの半分)、および

θ_i = 光線の入射角。

7.3.2 限界を 0.1 と仮定したとき対応する振幅は、例えば次のようになる

$a \leq 23 \text{ nm}$ 。これは $\lambda = 633 \text{ nm}$, $\theta_i = 0^\circ$ に対して、

および

$a \leq$ これは $\lambda = 488 \text{ nm}$, $\theta_i = 70^\circ$ に対して。

7.3.3 等価なrmsラフネス値は、正弦波プロフィールに対しておよび 0.1 の限界に対して次のようになる。

$R_q \leq 16 \text{ nm}$ 。これは $\lambda = 633 \text{ nm}$, $\theta_i = 0^\circ$ に対して、

および

$R_q \leq 36 \text{ nm}$ 。これは $\lambda = 488 \text{ nm}$, $\theta_i = 70^\circ$ に対して。

7.3.4 光散乱装置は、式 1 および 2 で表現される表面より粗い表面に適用できる。しかしその後PSD曲線と比較した他の数理的なアプローチを適用しラフネスまたは傾斜値を計算しなければならない。さらに、PSD曲線の傾斜はある状況で重要になりうる(Stover)。

7.3.5 超過することができない光散乱装置のための基本の高い空間周波数(短い空間波長)限界がある。この限界は次のとおりである。

a) 入射がグレイジング ($\theta_i = 90^\circ$) の場合、使用された光の波長の逆数の 2 倍, $2/\lambda$, そして

b) 入射がノーマル ($\theta_i = 0^\circ$) の場合、使用された光の波長の逆数, $1/\lambda$

これらの条件は、下記の一次元の格子方程式から直接導かれる。

6 Stover, J. C., "Optical Scattering, Measurement and Analysis," Second Edition, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA (1995): p. 79.

$$f_x = \frac{\sin \theta_s \cos \phi_s - \cos \theta_i}{\lambda} \quad (3)$$

ここで、

θ_s = 入射平面内の散乱角, そして

ϕ_s = 入射平面内の散乱角, そして

注 1: 光が入射平面内で入射光の方向に散乱される場合, f_x は-1 になる ($\phi_s = 180^\circ$)。

7.4 散乱計 (TIS)

7.4.1 これらの計器は 0 に近い入射角を最も頻繁に使用する。アクセス可能な空間の帯域幅の低周波数限界および高周波数限界は光学系の設計によって確定する。システムを適切に設計すると、約 $0.8 \mu\text{m}$ から約 $40 \mu\text{m}$ の空間帯域幅にアクセスする。散乱信号が低い空間周波数 (鏡面に近い) および高い空間周波数 (大きな散乱角) の帯域に分割されるように、これらのシステムが設計される。このタイプの計器の使用に関する情報は SEMI MF1048 を参照のこと。

7.5 角度分解光散乱計 (ARLS)

7.5.1 この技術の高い空間周波数限界は、入射角および散乱角ならびに使用された照明波長によって定義される。

7.5.2 低い空間周波数限界は下記によって与えられる。

- 上記の式 (入射角のための)
- ウェーハ表面の入射照明スポットの直径
- 光学系の立体収集角
- 鏡面反射光と検出器との間の、計器によって許可された最も小さい角距離

7.5.3 ラフネスは、固定の入射角を使用することにより、および入射面中の様々な散乱角で散乱光の強度を記録することにより測定される。その後、表面の二次元の PSD 曲線は散乱光の角スペクトルから計算する (BRDF)。上記の限界が許容される限り、rms 二乗平均平方根 (マイクロ) ラフネス, Rq も、rms 二乗平均平方根スロープ, m_q も、与えられた空間帯域幅の一次元または等方性のパワースペクトル密度 (PSD) 曲線から計算される。

7.5.4 そのような装置は、照明光の波長の半分から数百 μm までの空間の帯域幅範囲にアクセスする。

7.6 走査型表面検査システム (SSIS)

7.6.1 SSIS 測定は、それらが大きな立体角上の光を集めるという点で、TIS システムによるものと似た散乱測定である。しかしながら、いくつかの著しい差がある。一般的に、ほとんどの SSIS は反射するビームの $5 \sim 10$ 度以内の光収集を回避する。なぜならこの領域では、散乱はレーザ光散乱事象からの信号と競合する表面ラフネス散乱 (バックグラウンドノイズ) によって支配される傾向があるからである。初期の (旧式の) スキャナは単一の検出器を有し、非常に大きな立体角収集器からの光を一般に測定にしていた。後期のシステムは、いくつかの、より小さい収集角を使用する傾向がある。それぞれの収集角に対応する検出器がある。配置が何であれ、各収集角はその空間周波数帯域パス領域で定義される。また、各検出器は、ラフネスによって引起されるあるバックグラウンドヘイズ成分 (即ちしきい値) を持つ。したがって、レーザ光散乱事象がない状態では、測定されたヘイズは確定空間周波数に対して rms ラフネスに変換される。この変換は、表面がラフネス計算のために要求される必要な (滑らか、清潔、正面反射の) 条件を満たすとみなす。他の雑音源、例えばバックグラウンド電子ノイズおよびレイリー空気散乱は問題ではない。SSIS の較正と使用についての情報は、SEMI M50, SEMI M52, SEMI M53, および SEMI M58 を参照のこと。

8 ラフネス測定

8.1 パラメータ

8.1.1 一般的にシリコンウェーハ表面にはパラメータとしてrms ラフネス, R_q , と平均ラフネス, R_a , が使われる。頂と谷の差(表面プロファイルの最高点と最低点間の算術的差), R_t , そして10点ラフネス高さ(評価長さ以内で採られた表面プロファイル上の5最高プロファイル頂点の高さと5最低プロファイル谷の深さとの絶対値の平均値), R_z , などの他のラフネス測定パラメータも有用性が検証されている。このガイドラインはどのパラメータを使うかを提案するものではなく、むしろ任意のパラメータを標準化された測定仕様に如何に組み込むかを提案している。

8.1.1.1 SEMI MF1811 はある表面の直線的走査からラフネスパラメータの抽出に関する詳細情報を提供している。特に、関数 R_q は表面プロファイルの一次元測定と以下のように関連している:

$$R_q = \left[\frac{1}{L} \int_0^L Z(x)^2 dx \right]^{1/2} \quad (4)$$

8.1.1.2 N 個の等間隔点から成るあるプロファイルに対する R_q のデジタル近似は:

$$R_q = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

8.1.1.3 経験的には、プロファイルは常に測定の空間的バンド幅によって制限される。 N 個の等間隔点からなる長さ L のあるプロファイルに対して、低域側空間周波数限界 f_1 は $1/L$ より低くはなりえず、高域側空間周波数限界 f_2 はNyquist 限界 $N/2L$ より高くはなりえない。実際の場合、 $f_1 \approx 2/L$ で f_2 の到達可能な値は計器パラメータに依存している。

8.1.1.4 R_q もまた一次元パワースペクトル密度(PSD) 関数 $PSD(f)$ を測定のバンド幅内にある二つの空間周波数 f_1 と f_2 の間の空間周波数領域に亘って積分することによって見積もることができる:

$$R_q = \left[\int_{f_1}^{f_2} PSD(f) df \right]^{1/2} \quad (6)$$

8.1.1.5 全ての場合、 R_q は決定された空間周波数バンド幅間の低域側と高域側の限界、 f_1 と f_2 のそれぞれと一緒に報告されねばならない。代わりに、空間バンド幅は高い方と低い方の空間波長、 $\lambda_2 (= 1/f_2)$ と $\lambda_1 (= 1/f_1)$ のそれぞれによって表わされてもよい。

8.1.2 R_a と R_t はASME B46.1に議論されている。

8.1.3 R_z はISO 4287/1に議論されている。

8.2 測定箇所

8.2.1 ラフネスは、ウェーハ表面のどの個所のラフネスかによって相当に異なる。それは優先の方向または異方向性を有し、レイと呼ばれることが多い。多くの測定技術は、非常に小さい測定面積および1つか2つの走査方向に制限されている。したがって、代表的で再現性のある結果を得るためには特定の測定パターンを定義しなければならない。これらのパターンは、種々の製造工程においてウェーハ上で観察される影響に対応すべきである。これらの工程段階は、鏡面から無限大までの回転対称というウェーハ表面上の特徴を生成する。ウェーハスライシング工程は低い対称性を生じる。その一方、単一ウェーハ研磨は高い対称性を生じる。

8.2.2 少数のスポットだけが測定されるときに、スポットパターンおよび走査オリエンテーションを識別しなければならない。いくつかのパターンおよびオリエンテーションに関しては、図1を参照すること。他のものは利害関係者間で合意する。

8.3 サイトパターン

8.3.1 1 点 — これは、ある量のウェーハの結果を迅速に調べるときに役立つ。これはウェーハ中心点であることが多い。

8.3.2 少数の場所だけが測定されることになっているアプリケーションでは、ローカルの走査のパターンおよびオリエンテーションを識別しなければならない。測定は図 1 の中で概説されるようなサイトで実行される。走査パターン内の各位置の座標は表1に示される。この表で、 r は公称のウェーハ直径である。個々のローカルの走査については、代表的なラフネスが計算される。ウェーハの代表的なラフネスは、 n 個の代表的な走査値の関数である。ラフネス変動の計算は、平均、標準偏差、最大値または範囲(最大値 – 最小値)によって行う。他の統計アプローチを使用してもよい。

8.3.3 標準的なパターンは次のものを含んでいる：

- 1 点 ウェーハの中心
- 5 点 ウェーハの中心、およびウェーハの中心から $2r/3$ の所の 4 つの点
- 9 点 ウェーハの中心、およびウェーハの中心から $2r/5$ の所の 4 つの点、およびウェーハの中心から $4r/5$ の所の 4 つの点

注 2: これらのパターンは、一連の対称および値で有用なことが示された。シリコンウェーハの表面ラフネスに関する種々の実験とモデルが記述されている関連情報1を参照のこと。

8.3.4 標準の測定オリエンテーションパターンは次のものを含む：

- タイプ A — 線形走査であって、起点二等分面に平行および垂直なもの
- タイプ B — 線形走査であって、起点二等分面に関し 45° の角度をなすもの

注 3: タイプ A は、すべての表面に一般的に使用される。タイプ B は、(111)ウェーハの一部の表面条件に役立つと報告されている。

表 1 走査パターンロケーション

ロケーション		X,Y 座標 (SEMI M20 による)	走査方向 (線および面の装置に関して)。 下記と平行
中心点		0, 0	Y-軸
点#	ロケーション		
5 点パターン			
1	中心点	0, 0	Y-軸
2	$2r/3$	$0, 2r/3$	Y-軸
3	$2r/3$	$-2r/3, 0$	X-軸
4	$2r/3$	$0, -2r/3$	Y-軸
5	$2r/3$	$2r/3, 0$	X-軸
9 点パターン			
1	Center	0, 0	Y-軸
2	$4r/5$	$0, 4r/5$	Y-軸
3	$4r/5$	$-4r/5, 0$	X-軸
4	$4r/5$	$0, -4r/5$	Y-軸
5	$4r/5$	$4r/5, 0$	X-軸
6	$(r\sqrt{2})/5$	$(r\sqrt{2})/5, (r\sqrt{2})/5$	Y-軸
7	$(r\sqrt{2})/5$	$-(r\sqrt{2})/5, (r\sqrt{2})/5$	X-軸
8	$(r\sqrt{2})/5$	$-(r\sqrt{2})/5, -(r\sqrt{2})/5$	Y-軸
9	$(r\sqrt{2})/5$	$(r\sqrt{2})/5, -(r\sqrt{2})/5$	X-軸
フル FQA 走査			
フル FQA		ラスト走査	X-軸
フル FQA		同心円または渦巻き	R-シータ

8.4 帯域幅

8.4.1 2つの問題が、ラフネス結果の帯域幅に影響を与える。第1の問題はラフネス測定装置の帯域幅である。それは7項で論じる。帯域幅に影響を与える第2の問題は、解析ソフトウェアからの問題である。それはある空間周波数を強調するためにユーザによって選択される。長短両方の空間波長(または周波数)限界は、 μm (または μm^{-1})で定義されなければならない。測定へこの情報を入力する場合、仕様波長単位を使用すること。プロファイリング計装機器は、DIN 4768 および 4777 または ASME B46.1 によって調節された走査長さおよび帯域幅を持つべきである。