

ポピュラーサイエンス

驚異の魔鏡技術

釘 宮 公 一

松下電器産業株式会社中央研究所

〒570 守口市八雲中町 3-15

(1990年11月1日 受理)

Wonder of Makyoh Technology

Koichi KUGIMIYA

Central Res. Lab., Matsushita Elect. Ind. Co. Ltd.

3-15 Yagumonakamachi, Moriguchi-shi, Osaka 570

(Received November 1, 1990)

時代をさかのぼること紀元前、中国前漢の技術書に記述されていた魔鏡が、現代のハイテクに鮮やかによみがえった。緩やかな鏡面のわずかな凹凸を高感度で、しかも一度に大面積をマップ上に表示できるという他の表面分析法にない特徴を有している。このために超 LSI 用のウェーハーやマスクガラス、ハードディスク、液晶用ガラス等の鏡面の検査などに、さらには評価の困難な研磨工程管理に欠かせないものとなっている。また、表面欠陥の位置を確認し、大よその欠陥の種類を推定して、他の局所的な解析方法で詳細な評価を行うための事前評価法としての認識も広がっている。

1. はじめに

より完全な鏡面を必要とするハイテクが続々と出現してきている。VLSI 時代に突入した Si ウェーハーを初めとし、ハードディスク、液晶用ガラス等が続いている。これら鏡面の品質評価や解析技術は Si を中心として急速に進展し、ppb 単位の表面汚染や表面 1 nm レベルの汚染等の評価がなされるようになり¹⁾、また、局所的な nm レベルの欠陥についても詳細な解析が進められるようになった。しかし、表面形状の評価については、サブ μm レベルのマクロな解析ができるに過ぎず、まして研磨工程の評価は多分に現場的であり、技術者の勘の世界であった。今後ますます高度化するデバイス特性や信頼性を保証するには、鏡面状態の評価に留まらず、研磨工程を含めた総合的な評価が必要とされている。これには古代技術である魔鏡が最適であることが示された²⁾。正に“温故知新”の典型的な技術である。

魔鏡とは、その裏面の模様が厚い金属を透かして投影されるという、不思議な鏡である。この魔鏡の歴史は古く、その原点は黒陶、白陶、採色土器文化を有する殷の時代 (B. C. 1700 年頃) の、璧を製造する鏡面研磨技術にある。春秋-戦国時代半ば (B. C. 500 年) に既にその原型が見られ、前漢の時代 (B. C. 100 年頃) にほぼ完成

された。現在でもそうであるが、昔はことさらに研磨に年がかかっていた。鏡はいつしか神格化され、後漢時代 (A. D. 200 年頃) には皇位の璽として鏡と劍が継承された。日本にも伝えられ御神体として残っている。なかでも、投影像がキリストである隠れキリシタン鏡は有名になっている。現在も伝統的技法を継承する魔鏡師、山本龍鳳氏 (無形文化財) が京都に健在である。

本稿ではまず、神秘的で、かつ不可思議な伝統的芸術、魔鏡の原理：魔鏡による鏡面像の変換＝魔鏡トポグラフを解説し、次に Si ウェーハー等の鏡面の表面状態、その研磨工程評価、更には他の鏡面への応用について実施例を紹介しながら驚異の魔鏡技術の概略を述べる。

2. 魔鏡による投影像変換：魔鏡トポグラフ

2.1 魔鏡の原理

以下の4案が、魔鏡の原理として考えられている。

- 1) 魔鏡反射像はわずかな鏡面の凹凸の投影
- 2) 表面ないしは直下の欠陥による光反射率の変化
- 3) 光透過により、裏面の模様や内部歪を投影
- 4) 表面の汚染等による光反射率の変化

後述のように、ガラスなどの透明な鏡面に対しては、内部や裏面を透過観察できるので、案 3) の光透過が働いている。しかし、金属材料に対しては、数 mm の厚さを透過して裏面の歪を映すことはない。結晶欠陥や格子歪により反射率は変化するが、これらがクラスター状に集積しても、視覚的に認められる mm サイズにならない。X線トポグラフィによって検出されている欠陥は、傷、スリップ、ウェーハーの全体の格子歪であり、その他の魔鏡で観察される表面欠陥 (例えば、ソーマーク) は観察されない。これらのことより、案 2) は考えられない。一方、案 4) の汚れ等による反射率の低下は認められている。例えば、テフロンピンセットによって Si を挟んだ時に形成される汚染などは、斜めに透かして注意して観察すれば、反射像に対応した所に薄い油滴のように汚染が認められる。

さて、投影面の位置を変えることによって反射像の明暗模様の形状が変化し、像が拡大ないしは縮小する事实は、案 1) の表面の微少な凹凸が主因である事を示している。このような凹凸が、どのようにして形成されるのか、古来より多くの冶金学者が魔鏡の破断面等を評価検討し³⁾、現在では研磨時の応力による変形と解明されている。

基本的な魔鏡トポグラフの原理を図 1(a) に示す。平滑な鏡面といえども、ミクロには様々な曲率半径を持った凹凸面が連続していると仮定できる。例えば、図に示す凹面 (凹面鏡) の場合には、その焦点近傍が明るく、

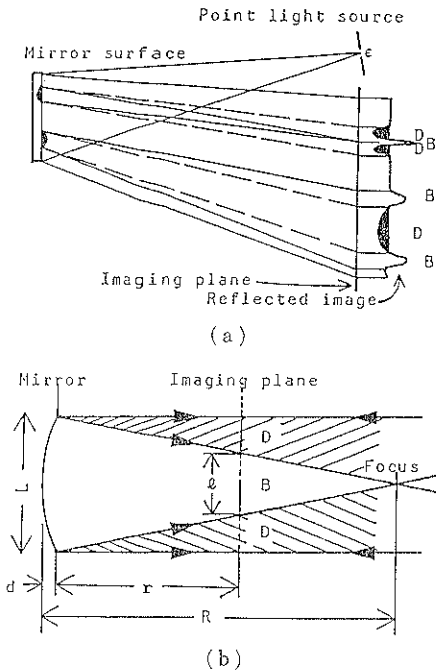


図 1 魔鏡の原理図。

その回りは反対に暗くなる（凸面の場合には明暗が反転）。この様に明暗が隣接して変化するために輪郭が強調され、視覚的に認知しやすい反射像を得る。このため非常にわずかな変化を簡単に鋭敏に検出できる。以下この凹凸が変換された明暗像を魔鏡トポ像と呼ぶ。なお図より明らかなように、スクリーンの位置によっては明暗の形成状況が逆に成り得る事もある（例えば、表面の傷：急峻な凹みでは反射光は発散して黒線が残る）。これは非常に重要な事実であり、曲率半径が大きく異なる凹凸が混在している鏡面では、魔鏡トポ像より元の面の凹凸状態を完全には復元できない事を示している。しかし、現在では優れた鏡面が求められており、鏡面の平滑性が高く（表面凹凸の曲率半径は 5~100m）、問題はない。

2.2 魔鏡トポグラフ装置

以上の原理を用い、小型化した装置の外観を図 2 に示す。均質な光源、高感度の CCD カメラ、高品質の光学系で構成されている。これらの歪が鏡面の凹凸の検出限界を規定するので、装置の製造には高度な技術が必要とされる。しかし、装置の保守管理は可動部分も無く非常に容易である。魔鏡トポ像は TV モニター上に表示される。装置の全長は約 80 cm であるが、感度パラメータの設定によって、 r が 100 m の距離に相当する高感度の鏡面評価ができる。

本装置の開発により、素人でも鏡面の厳密な観察が可能となった。鏡面検査での画期的な出来事といえる。



図 2 魔鏡装置の外観。全高約 80 cm、幅約 60 cm。
（山下電装株式会社のご好意により掲載。30 cm 角まで対応できる。）

2.3 魔鏡トポグラフの感度

魔鏡トポグラフの幾何学的な等価光路を図 1 (b) に示す。次式²⁾

$$R = L / (L - l) \cdot r$$

$$d = L(L - l) / 8r$$

の関係から、感度は

$$l \text{ と } \rho = 2R = L^2 / 4d$$

で与えられ、 L や d に直接依存しない。 ρ が一定であれば非常に浅い凹凸も観察できることが分かる。本方法の大きな特徴である。さらに、魔鏡トポ像では大きな凹凸による明暗が消えれば、その陰に隠れていた小さな凹凸が目立つようになることから、鏡面の平滑性が向上すればするほど、本魔鏡による微細な評価がさらに一層効果的になってくる。

ここで、代表的な魔鏡トポ像として、Si ウェーハ上上の凹凸（図 3：3 インチの Si ウェーハ全面にポリッシングマークが 80~100 本存在）の場合を考えよう。平均的には $L = 0.75 \sim 1 \text{ mm}$ 、 $l = 0.38 \sim 0.5 \text{ mm}$ であるから、上式より $d = 6 \sim 10 \text{ nm}$ となる。非常に浅い凹凸を検出しており、他の方法では得られ難い高感度を得ている²⁾。しかも、Si ウェーハ全面の異常を一括表示できる他の方法にはない特徴がある。

2.4 他の評価法との対比

本方法の分解能、感度や特徴をいくつかの実例を示しながら、他の方法と対比する。

タリサーフ実測例との対比を図 3 に示す。緩やかな凹凸が明暗の縞模様に変換されているのが明確に示されて

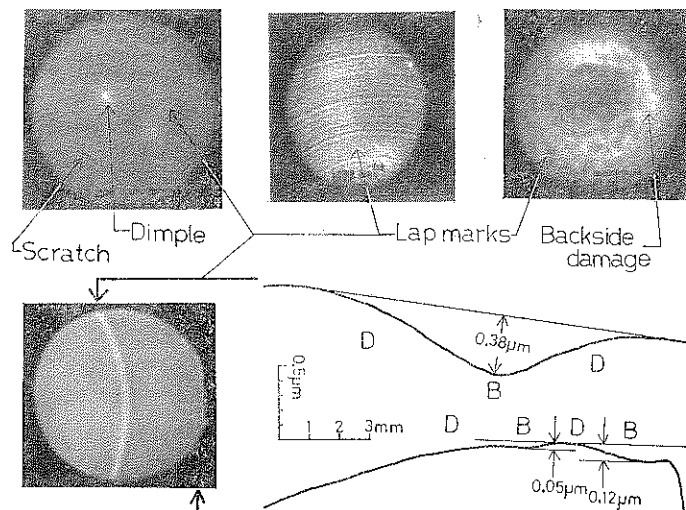


図3 典型的な魔鏡トポ像の例および表面凹凸測定との対比。

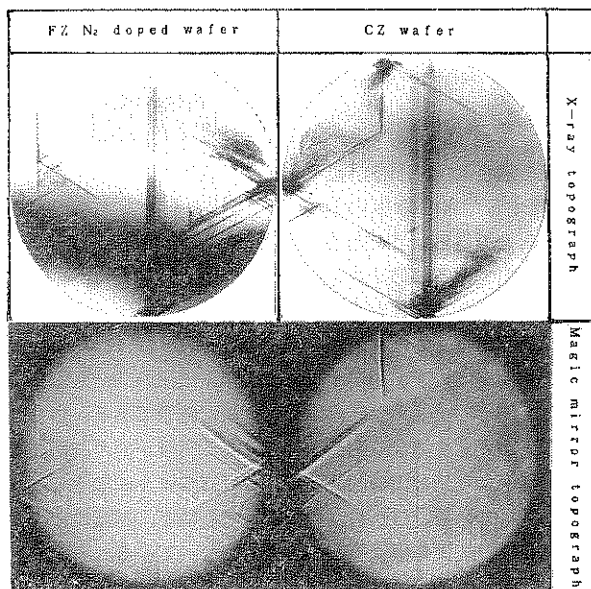


図4 魔鏡トポ法とX線トポ法によるスリップ観察例。

いる。図4にスリップの魔鏡トポ像を示す。Siのエピタキシャル成長工程はスリップが発生しやすくわずかな変動も許されない。この管理は従来エッチングやX線トポが使用されているが簡単ではない。本魔鏡トポによれば手軽に明確に評価できる。X線トポと良く一致しているが、詳細に見れば、一方が見落としているスリップもあり、どちらも完全とはいえない。一般にX線トポグラフィではウェーハ表面のみならず、裏面までの欠陥を検出するので結晶性の評価には良いが、ウェーハの表面のみの評価には適さない。なお、スリップのタリ

サーフによる実測値と対比することによって、本魔鏡トポ法は微小な10~20nmの段差を明瞭に検知していることが示された。

モアレ模様を示すフリンジ法では等高線から高低差が読み取れるが、凹凸の判別はできない。一方、魔鏡では全体的な凹凸は中心部の明暗で判明できる。すなわち、凹部は明るく、凸部は暗い。また、反り d はSiウェーハの魔鏡トポ像の外径 l から次式により計算される。

$$d = L^2(1 - l/L)/8r$$

L はウェーハの直径、 l は観測されたウェーハの直

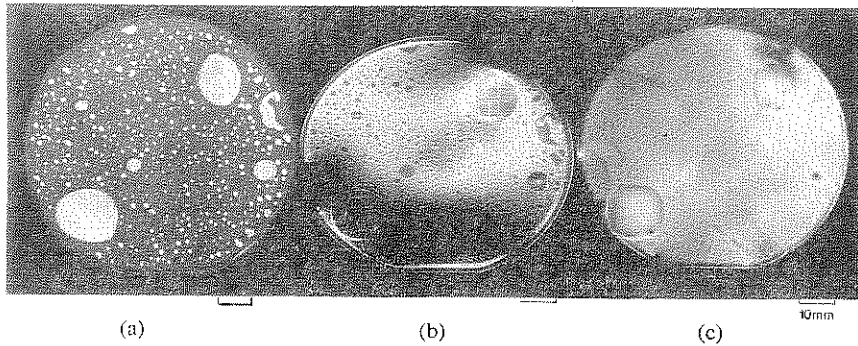


図 5 (a)超音波法, (b)X線-トポ法, (c)魔鏡トポ法による SOI 基板観察例。

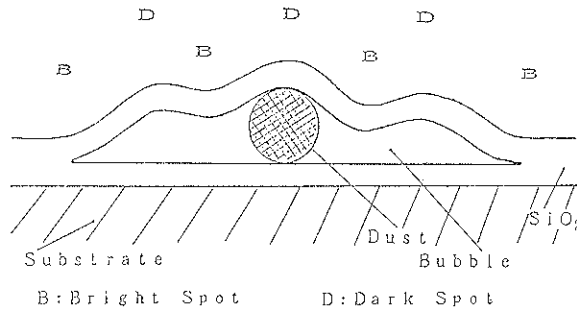


図 6 図 5 で観察される気泡の断面構造。

径, r は前述の装置パラメーターである。従って, 魔鏡では反り量と凹凸が判定でき, この様な反りから残留応力が計算される⁴⁾。なお, 大きな不均一歪をもつ Si ウェーハの魔鏡トポ像は長楕円やおむすび型にまで変形する。

2 枚のウェーハを直接張り合わせた SOI 基盤の接着状況を, 超音波法, X線-トポ法や本方法で対比した例⁵⁾を図 5 に示す。いずれの方法でも接着界面に無数の気泡が包含されているのが明確に示されている。X線-トポ法や本方法ではスリップや小さな塵が明確に検出されており, 両者の一致は良い。一方, 超音波法ではこれらを全く観測できない。さらに, 魔鏡トポ像の明暗の解析から気泡の断面構造(図 6)が推定される。すなわち, 加熱によりウェーハが焼結接着する時に界面に挟まれた塵埃で微少な隙間が生じ, 次に気泡の形成膨張が, 最後に天井部の懸下が生じたことが本魔鏡トポ像の解析のみで分かる。

3. Si ウェーハの表面評価及び解析

3.1 魔鏡トポ像はウェーハの指紋

一般的に観察される典型的な欠陥例をすでに図 3 に示した。表面の傷や試料番号等の卦書きは黒く観察され, 裏面にある場合には明るく観察される。裏面に入れられたバックサイドダメージは, 傷と同様に裏面での張力の

ために凹部を形成し, 雲の様な明部が観察される。研磨時にラップ盤の中心にウェーハを貼付した場合に生ずる同心円状の研磨痕跡や, 同形状のスワールや, 梨地模様をした魔鏡トポ像が観察されている。罫は, 明部として現れる緩やかな凹面であり, 最も高い頻度で観察される。ラッピングマークも数多く観察されている。これらはメーカー固有の特徴となっており, 熱処理などでも変化しないことから, 魔鏡トポ像はウェーハの指紋と言える。

魔鏡により従来の肉眼などによる検査では見逃されていた表面欠陥が多数観察された(図 7)。正常なウェーハの大きさは(5)である。(7)はウェーハの端部が皺よった様に観察され, (8)では中央背の部分に大きな傷があるように折れ曲がっている。ところが直径に顕著な差の無いことから, 折れ量を補正する様に逆に緩やかに反っていることが示されている。エピウェーハ(10)では, 虫が這回った跡の様な太い黒線が残されている。一部はフレーク等がウェーハ上を移動した跡や, ピンセットでふれた跡に相応している。回りが白くなり, 内部の黒い部分を囲んでいる黒い罫様の突出物は, ウェーハの研磨時に定着とウェーハの間に空気が巻き込まれたことを示している。テフロン転写が生じ, 触った跡が点や摺跡となって黒く観察された例もある。反射率の差によって観測された魔鏡トポ像の事例である。その

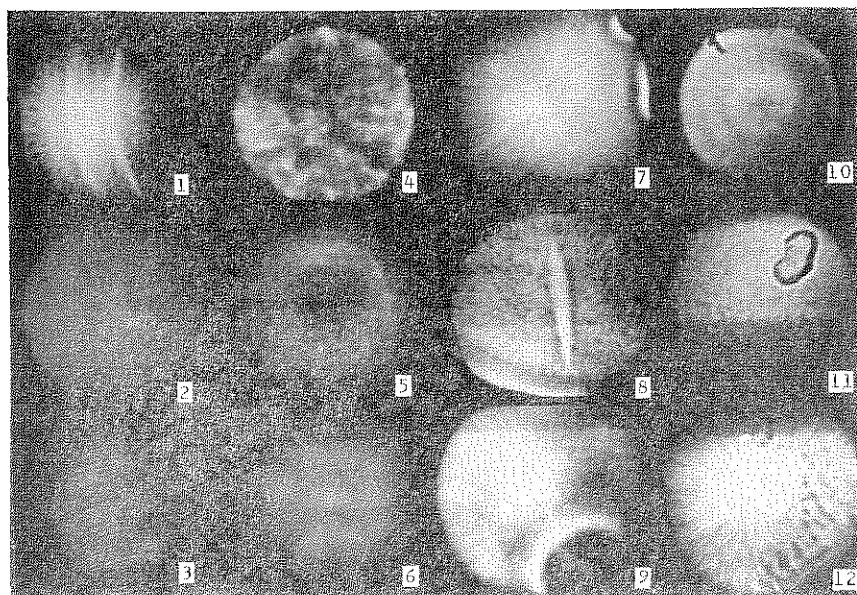


図 7 魔鏡トポ像による異常鏡面例。

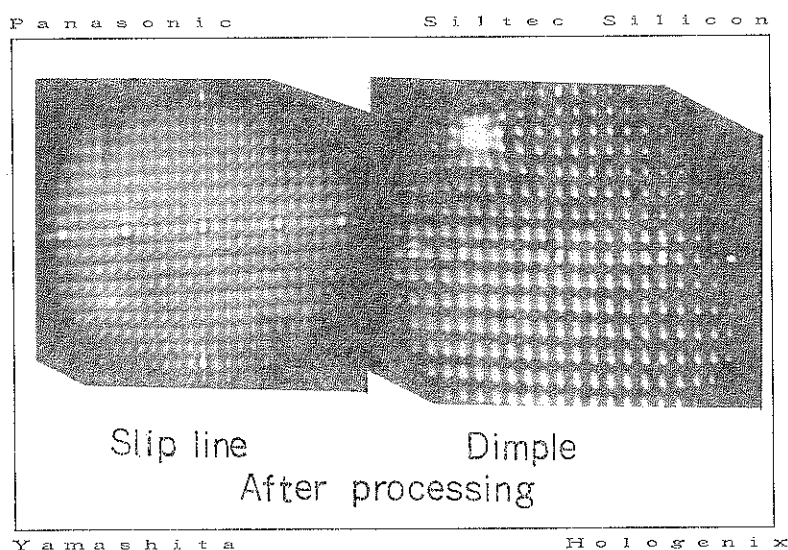


図 8 IC パターンを通して観察されるスリップと罫のトポ像。

他、従来、全く気づかれていなかった不可解な魔鏡トポ像が数多く観察されている。さらに重要な点は、研磨盤やクロス等の研磨工程変化が魔鏡トポ像に鋭敏に反映されることである。高感度な魔鏡装置の導入により研磨プロセスの詳細な解析と管理が初めて可能となった。この結果、非常に良好な鏡面ウェーハが定常的に得られるようになった。

3.2 半導体プロセスへの応用

一般に、プロセス中の複雑な熱処理や異種材料の積層等によって、反り、残留歪、結晶欠陥やスリップ等が誘

起され、特性劣化が生じる。これらの管理は超 LSI の高度化に伴って、ますます厳格となっている。魔鏡は前述のようにスリップの形成やフレークの集積を鋭敏に検出することから、熱処理装置のドリフトの管理等に効果的に使用されている。熱処理等によるウェーハの変形も簡単に管理でき、基盤目の IC パターンによって示される変形が明確に観察できると共に、パターンを通してスリップや罫が観察される(図 8)。魔鏡トポグラフ法はウェーハ上にパターンが形成されていても適用でき、さらにその変形が目視できる特徴があり、有効な解析法

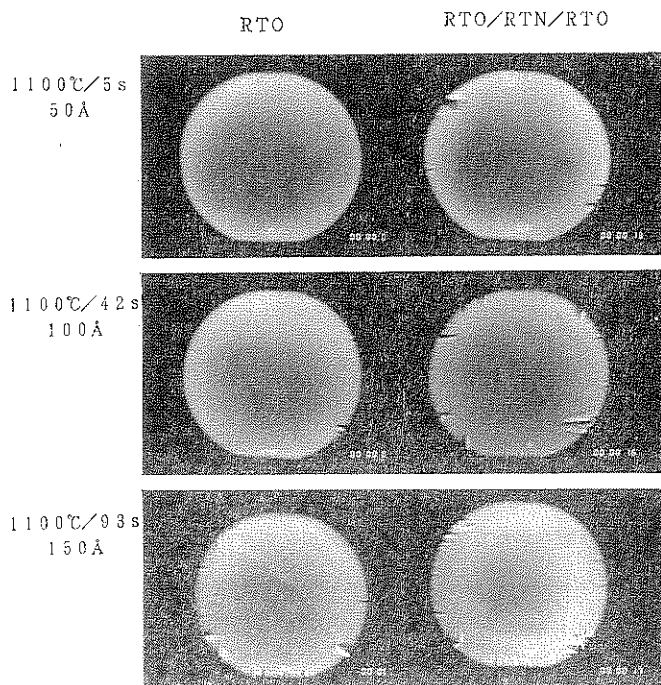


図 9 急速加熱法におけるスリップ発生。
RTO: 酸素中急速加熱, RTN: 窒素中急速加熱。

管理法となっている。特にエビ工程の条件設定や、工程管理に不可欠な手法となってきた。

数秒の急速加熱に応用した例⁶⁾を図 9 に示す。熱処理時間の長い、熱処理回数の多いウェーハ周辺にスリップが多く発生しているのが一目瞭然である。

4. 各種の鏡面への応用例

魔鏡トポグラフは、Si ウェーハ以外にも鏡面であれば、透明、不透明にかかわらず広く応用されている。

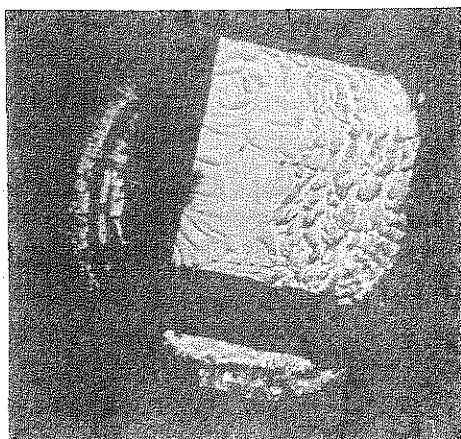


図 10 InP ウェーハ表面の魔鏡トポ像。

4.1 化合物半導体への応用

最近、GaAs ウェーハの改善は著しく、本方法で評価できるレベルに向上している。図 10 に各種化合物半導体ウェーハの評価例のうち InP の例を示す。InP, ZMR ウェーハには SEM, TEM 等の微小構造解析で見逃しているマクロな結晶性に問題点がまだまだあることを示している。Si ウェーハでは見られない、真空チャックや、エビウェーハの異常も明確に検出しており、ハンドリングにおいて材料物性の差を考慮すべきことを示している。

4.2 ハードディスク、光磁気ディスクへの応用

ハードディスクの高度化に伴って、ヘッド/ディスク間距離が $0.2\ \mu\text{m}$ 以下になりつつあり、表面均一性が一層重要になっており、工程管理に魔鏡トポグラフが導入されている。図 11 に示すように、光磁気ディスクでは、ポリカーボネート等の基板内の脈理やフォルマーティングが明瞭に観察されている。磁気ディスクでは研磨時のリサージュパターン等の特徴が認められている。図中のマークは包含された異物などの欠陥を示している。

4.3 ガラスへの応用

ラップトップパソコン等に用いられている液晶ディスプレイは、TV への応用が広がりつつあり、それに伴って、色ずれの原因となる $0.1\ \mu\text{m}$ のわずかなガラスの歪

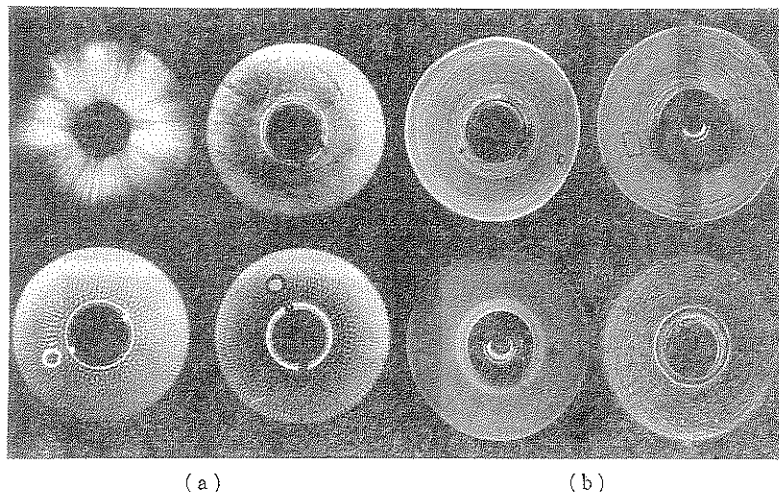


図 11 ハードディスク、光磁気ディスクの魔鏡トポ像。表面処理法の違い、内部構造が観察されている。(a)磁気ディスク、(b)光磁気ディスク

みが大きな問題となっている。先行的な評価によれば、異方化処理や塗布むらの評価⁷⁾にも本方法が非常に有効であることが示され、製造工場にも導入されようとしている。このため、90 cm 角の大面积ガラスを評価する大画面用装置が試作されている。また、LSI 用のブランクガラスの検査にも重用されている。

5. ま と め

魔鏡：科学やハイテクに似合わぬ響きのする古来の技術であるが、現在鏡面の評価には欠かせないものになっている。正に“温故知新”の典型技術といえる。

本魔鏡トポグラフは、

- a) 非破壊非接触で
- b) 5 nm レベルの非常に緩やかな凹凸等の表面形状変化（潜在欠陥）を、30 cm に及ぶ大口径の鏡面全面にわたり一括して一目瞭然に可視化して瞬時に表示し、
- c) そのトポ像から断面形状を定性的に復元でき、
- d) しかも操作や保守は簡単であり、素人でも正確な評価が可能

という他に類の無い特異な評価法である。

この特徴を活かして、鏡面評価ではまず、本方法で全面の欠陥の性質や分布を定性的、半定量的にマクロに把握し、次いで、特定した場所を微小分析することによって、効果的にさらに一層充実した鏡面全面の評価を行う

ことができる。従来の微細表面分析ではややもすれば局所的な評価に陥るのを防止できる。

又、本方法は原理的に鏡面状態が向上するほどより細かな表面凹凸を評価できるようになること、表面吸着膜や単層膜の評価にも適していることから、本稿で説明した鏡面や研磨プロセスの評価に留まらず、今後の超鏡面の古くて新しい評価方法として期待が広がっている。

文 献

- 1) J. H. Matlock: Solid State Technol. **26**, 111 (1983).
- 2) K. Kugimiya: J. Electrochem. Soc. **130**, 2123 (1983).
- 3) J. Naylor: The Journal, New England J. of Photographic History **94/95**, 16 (1983).
- 4) W. L. Bond: Acta Cryst. **13**, 814 (1960).
- 5) O. Okabayashi, H. Shirotori, H. Sakurazawa, E. Kanda and M. Kawashima: Third International Conf. on Defect Recognition and Image Processing for Research and Development of Semiconductors (DRIP-3), X-7-3 (1989).
- 6) P. R. Blaustein and S. Hahn: Solid State Technol. **12**, 27 (1989).
- 7) Y. Hayashi, Y. Sasaki, S. Sumita and K. Kumagawa: Third International Conf. on Defect Recognition and Image Processing for Research and Development of Semiconductors (DRIP-3), X-7-4 (1989).