

電子素子基板の微小欠陥検出技術の研究（第1報）

小松 利安・坂本 智明

Study on Minute Defect Detection Technology of Electronic Device Substrate (1st Report)

Toshiyasu KOMATSU and Chiaki SAKAMOTO

要 約

近年、LEDやパワー半導体等の基板材料として利用が増加しているサファイヤ、シリコンカーバイド等の基板材料は、加工技術の蓄積があるシリコンウエハと異なり、研磨加工すると傷や欠けなどの微小な欠陥が1 μm 以下のレベルで発生する比率が高く、生産現場で加工表面を測定・評価する必要がある。しかし、1 μm 以下の微小形状の場合、結晶欠陥のような凹形状と、付着異物のような凸形状の判別は、既存のレーザー変位計では難しい。

そこで、本研究では、光学的各種測定法について、非接触で微小な凹形状と凸形状が判別可能か調査を行った。また、走査型白色光干渉法と共焦点(コンフォーカル)光学系を用いた方法で、1辺が0.5 μm の正方形の凸形状と凹形状が形成された測定用標準試料で測定実験を行い、形状判別は十分可能であることを確認した。

1. 緒 言

LEDやパワー半導体等に使用される基板材料としては、従来のシリコンウエハだけではなく、サファイヤやシリコンカーバイド等が使用されている。しかし、これらは研磨加工等により、傷や欠けなどの微小欠陥や、付着物が1 μm 以下で発生する場合があります。加工表面の品質を測定・評価する必要がある。

測定・評価においては、接触式では測定面に傷を付ける可能性があるため、非接触で測定できる方法が望まれている。しかし、1 μm 以下の微小な形状を、光学顕微鏡で観察すると、図1に示すように、結晶欠陥のような凹形状か、表面に付着した異物のような凸形状か区別できない。また、レーザースポット径が数 μm 程度の既存レーザー変位計を用いても、1 μm 以下の微小形状の判別は難しい。電子顕微鏡を使用すれば観察は可能であるが、試料の前加工処理等が必要であり、生産現場での評価機器としては適していない。そこで、生産現場で1 μm 以

下の付着異物と微小欠陥が判別可能な測定技術が求められている。

そこで、本研究では、非接触で測定可能な光学的計測法について論理的に検討し、微小形状の判別可能性について調査を行った。さらに、微小形状の測定用標準試料を用いて測定を行い、凹形状か凸形状か判別が可能か実験を行った。

2. 光学的測定法の検討

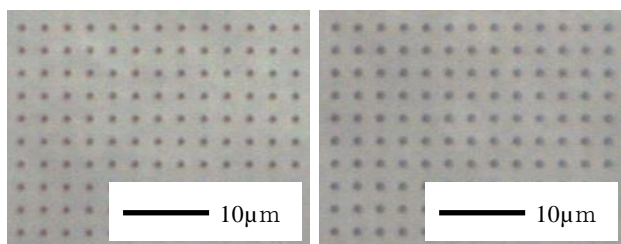
本研究では、微小形状の測定が可能と考えられる5種類の方法について検討した。

2-1 光切断法

本方法は、帯状の光を照射し、表面形状に沿って反射する光を検出し、表面形状をパターンとして測定する方法である。本方法で寸法測定を行う場合は、一般的なレーザー変位計と同様に、三角測量の原理を利用する¹⁾。図2(a)に示す光学配置の場合、測定面上の点Pまでの距離 Z_c は、投影部の角度を α 、撮影部の角度を β 、投影部と撮影部の距離を L_c とすると、次式で求められる。

$$Z_c = \frac{\tan \alpha \cdot \tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta} \cdot L_c \quad \dots (1)$$

原理的に単純で装置も簡易的にできるところから、多くの応用例があるが、測定精度は図2に示す光学系の配置によって決まる²⁾。角度 α を90度とした図2(b)の光学配置で、距離が ΔZ_c だけ変化した場合の、撮影部角度の変化量 $\Delta \beta$ について検討する。関係式は次のように



(a) 凸形状 (b) 凹形状

図1 微小形状の光学顕微鏡での観察例

表すことができる。

$$Z_c + \Delta Z_c = L_c \times \tan(\beta + \Delta\beta) \quad \dots (2)$$

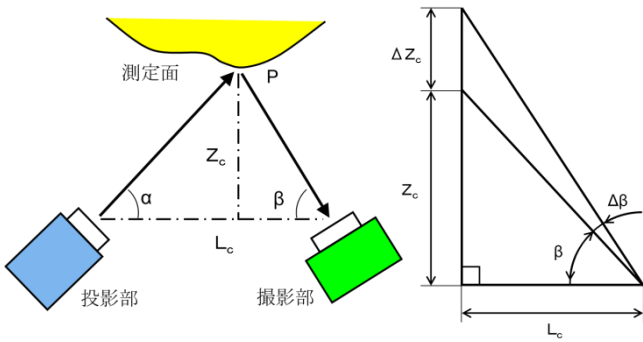
また、加法定理により式(3)が、図 2(b)より式(4)が成り立つ。

$$\tan(\beta + \Delta\beta) = \frac{\tan \beta + \tan \Delta\beta}{1 - \tan \beta \tan \Delta\beta} \quad \dots (3)$$

$$\tan \beta = \frac{Z_c}{L_c} \quad \dots (4)$$

式(2)に式(3)・(4)を代入すると、 $\Delta\beta$ は次式で求められる。

$$\Delta\beta = \tan^{-1} \frac{\Delta Z_c \cdot L_c}{L_c^2 + Z_c^2 + \Delta Z_c \cdot Z_c} \quad \dots (5)$$



(a) 一般的な光学配置 (b) $\alpha = 90$ 度の場合
図 2 三角測量の原理図

例えば、 $L_c = 10 \text{ mm}$ 、 $Z_c = 10 \text{ mm}$ で、 $\Delta Z_c = 0.001 \text{ mm}$ の微小変位があった場合、 $\Delta\beta$ は約 0.0029 度となり、非常に微細な角度検出が必要となり、測定が難しくなる。原理的に $\Delta\beta$ の検出精度を高めるためには、 L_c の値を増加させれば良いが、 L_c が大きいと影による死角も増加するため、この方法には限度がある。また、測定原理以上に、光切断位置の特定方法や投光・撮影系における内部パラメータの調整が重要となる。さらに、光切断法では帯状の光を照射しているが、どの角度から照射された光を検出したのか高精度に測定することが難しい場合もある³⁾。

2-2 モアレトポグラフィ法

本方法は、格子像を投影し、表面形状で変形した格子像と基準格子を重ねて、モアレ等高線を発生させ、その形状から表面形状を測定する方法である。この方法には測定面の直前に格子を置く実体格子型と、基準格子を測定面に投影する格子投影型の2種類がある。ただし、原理的には両方とも同等なので、実体格子型を基にした図3に示す原理図にて検討を行う。格子から n 番目のモアレ

n 等高線までの距離 h_{mn} は次式で求められる。

$$h_{mn} = \frac{n \cdot p \cdot L_m}{d_m - n \cdot p} \quad \dots (6)$$

p は格子のピッチ、 L_m は光源・観察点から格子までの距離、 d_m は光源と観察点の距離である。一般的に $d_m > n \cdot p$ なので、2つの等高線間隔は $p \cdot L_m / d_m$ と近似できる。格子のピッチが小さいほど精度が良くなるが、回折現象の影響を避けるため、 $8\mu\text{m}$ 程度が限界ともいわれている⁴⁾。しかし、最近ではモアレパターンを移動させる位相シフト法や、液晶格子等を用いて格子のピッチを変化させる周波数変調法を適用して、高精度測定が可能となっている。

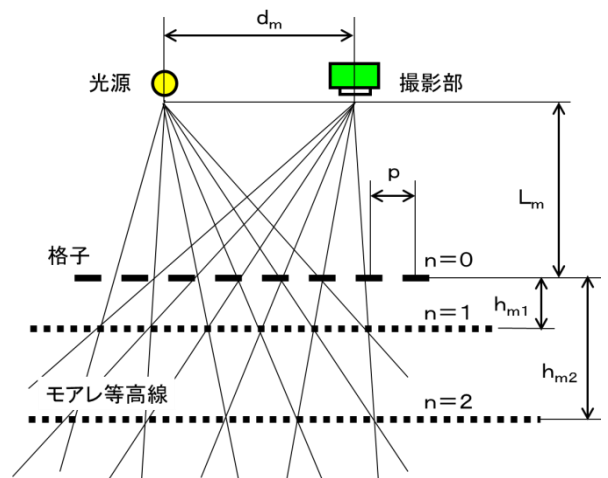


図 3 モアレトポグラフィの原理図

2-3 干渉縞を用いる方法 (干渉計)

本方法は、測定面からの反射光を参照面からの光と重ね合わせて干渉縞を発生させ、その縞の形状から表面形状を測定する方法である。測定面と参照面からの反射光の光路差が波長の整数倍なら干渉光は明るくなり、半波長ずれると暗くなる。光の入射角を θ 、反射面(干渉縞)の間隔を h_i とすると、図4に示す光路差 L_i は次式で求められる。

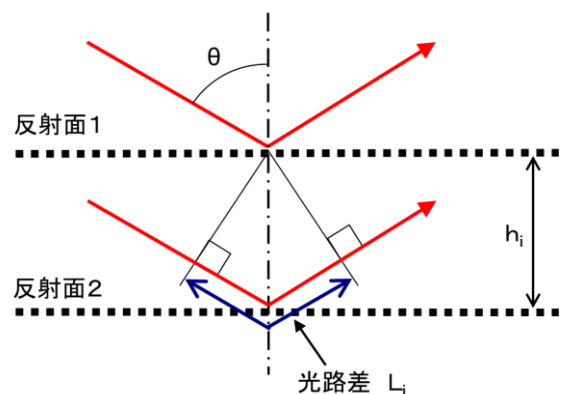


図 4 光路差の原理図

$$L_i = 2 h_i \cdot \cos \theta \quad \dots (7)$$

この光路差が波長 λ と同じ長さになった場合、干渉縞は明るくなるため、干渉縞の間隔は次式で表される。

$$h_i = \frac{\lambda}{2 \cdot \cos \theta} \quad \dots (8)$$

特に、光を垂直入射させた場合($\theta = 0$)は波長の半分となり、これが干渉計の精度となる。使用する波長が短いほど精度は向上する。また、参照面を微小駆動し光路差を変化させて、干渉縞をシフトさせる位相シフト法を用いて、さらに高分解能を可能としている。しかし、本方法は基本的に平滑面が測定対象であり、表面形状が急激に変化する場合に位相飛び等が発生し、測定できないという欠点がある¹⁾。

2-4 走査型白色光干渉法

本方法は、干渉計の1種であるが、光源に白色光を用いて、測定面に対して垂直方向に走査して干渉縞の変化を合成し、三次元形状を測定する方法である。測定面と参照面との光路差が零となる箇所で、図5(a)に示すような干渉波形が得られる。このピーク位置が測定面の高さに対応しており、図5(b)に示すように垂直方向に走査することで、三次元形状を一括して求めることができる。垂直方向への駆動にピエゾ素子を用いることで、高さ方向の精度はnmオーダーでありながら、数mm程度の大きな段差にも対応可能な方法である。

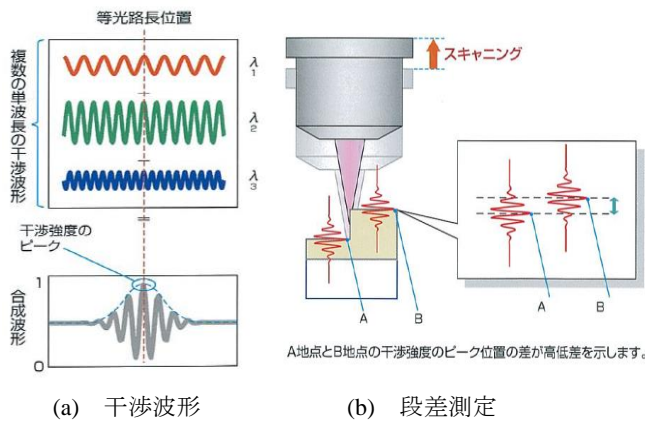


図5 走査型白色干渉計の原理図
(zygo社パンフレットより抜粋)

2-5 共焦点(コンフォーカル)光学系を用いた方法

図6に示すように、検出器の前にピンホールを設け、測定表面に焦点が合った場合に光がピンホールを通過するように設計された光学系が、共焦点光学系である。周辺からの不要な散乱光の影響を受けにくく、焦点位置以外からのぼやけた画像はカットされ、コントラストのよい焦点が完全にあった画像を得ることができる。そこで、

本方法は、測定面に対して垂直方向に走査して、段差のある測定面のすべての高さ位置に焦点のあった画像を取り込むことで、高精度な三次元測定を行うことが可能である。本方法も高さ方向の精度は数nmオーダーである。

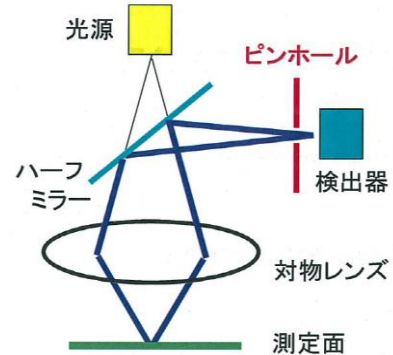


図6 共焦点(コンフォーカル)光学系の原理図

3. 調査結果および考察

3-1 光学的測定法の検討結果

5種類の方法について検討したが、1 μ m以下の微小形状の測定に対する傾向について表1に示す。各方法とも測定精度の向上は著しいが、特に、走査型白色干渉法と共焦点光学系を用いた方法については、白色光源に含まれる複数波長の位相差を検出することで精度を向上させ、1 μ m以下の微小形状測定を可能としている。

表1 光学的測定法の傾向

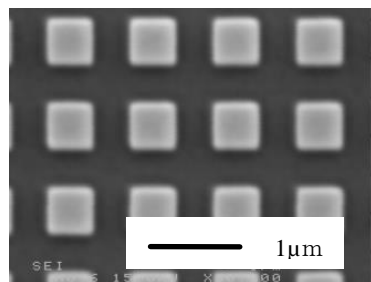
光学的測定方法	精度的に対応可能か	不連続な形状に対応可能か
光切断法	△	△
モアレトポグラフィ法	○	○
干渉縞を用いる方法	○	△
走査型白色干渉法	◎	○
共焦点光学系を用いた方法	◎	○

△：やや不向き ○：適する ◎：非常に適する

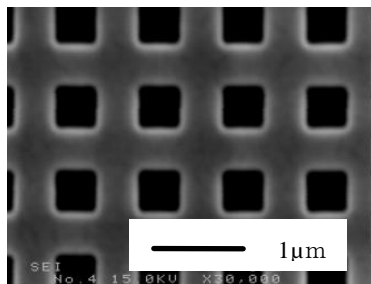
3-2 測定用標準試料の測定結果

本研究では、調査結果を基に、数種類の寸法パターンで凹形状や凸形状、直線形状が形成されている、石英製の測定用標準試料(NTTアドバンステクノロジー(株)製:NIM-PH350)を測定した。測定した形状は、1辺が0.5 μ mの

正方形の凸形状と凹形状である。図 7 に電子顕微鏡(日本電子(株)製:JXA-8900RL)で撮影した凸形状と凹形状の写真を示す。



(a) 凸形状



(b) 凹形状

図 7 測定用標準試料の電子顕微鏡写真

2-4 で検討を行った原理を活用した走査型白色光干渉計(zygo 社製:NewView 6300)と、2-5 で検討した共焦点光学系測定機(レーザーテック(株)製:OPTELCIS H1200)をセンターで所有していることから、測定用標準試料を測定し、その測定結果を図 8 および図 9 に示す。両方法とも、測定結果が正方形の形状になっていないのは、一般的な光学的測定機の水平方向分解能が、 $0.2\mu\text{m}$ 程度であるからと考えられる。検出器の CCD 画素数の増加や、高倍率の対物レンズを使用して、水平方向の分解能が向上すれば解決すると思われる。また、凹形状の場合、反射光の強度が弱いため、測定はより困難であった。しかし、今回の測定結果から、凸形状か凹形状かの判別は十分可能であることが確認できた。

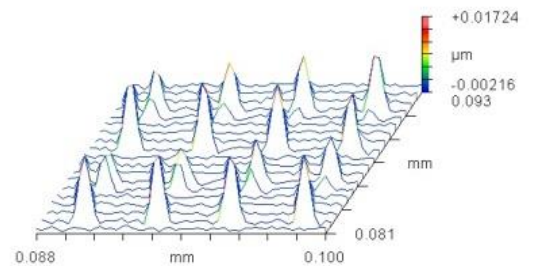
4. 結 言

本研究では、 $1\mu\text{m}$ 以下の凹形状と凸形状が判別可能な、光学的各種測定法について検討を行い、測定用標準試料を用いた測定を行ったところ、次の結果が得られた。

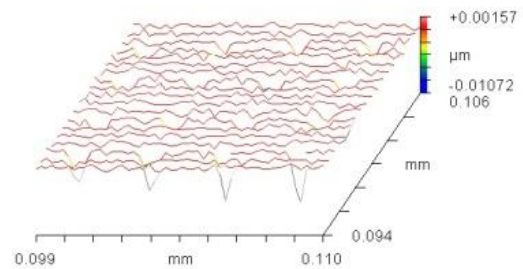
- (1) 5 種類の方法について調査・検討し、その測定傾向について明らかにした。
- (2) 走査型白色光干渉法と共焦点光学系を用いた方法で測定したところ、 $1\mu\text{m}$ 以下の凸形状か凹形状かの判別は十分可能であることを確認した。

今後は、生産現場で測定・評価が可能な方法につい

て、共焦点光学系を用いた方法等を中心に検討する予定である。

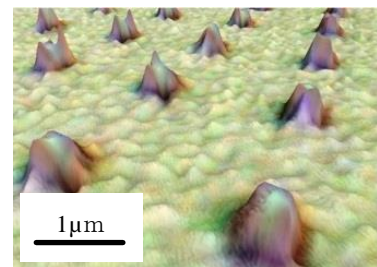


(a) 凸形状

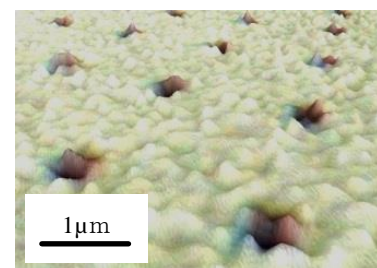


(b) 凹形状

図 8 走査型白色光干渉法を用いた測定結果



(a) 凸形状



(b) 凹形状

図 9 共焦点光学系を用いた測定結果

参考文献

- 1) 吉澤 徹 編著：最新光三次元計測,朝倉書店,P.3-73(2006)
- 2) 稲荷隆彦：電気学会論文集 D,Vol 110,No 3, P.202(1990)
- 3) 計測自動制御学会,SICE オンライン・ハンドブック
- 4) 横関俊介,新井泰彦,山田朝治：精密工学会誌,Vol 62, No 5, P.657(1996)