

2024年度 新産業創出研究会「研究成果報告書」

「周波数変調式多波長デジタルホログラム記録による

マルチスケールでの半導体基板加工面の計測技術」

〔島根大学・教授〕 〔横田 正幸〕

1. はじめに

近年、脱炭素化社会実現のため大電力変換と制御を担うパワーモジュールが注目されている。これを構成する絶縁放熱基板では、パワー半導体から放出された熱により発生する応力に耐えうる高い機械的特性が要求される。その中で、耐高電圧特性、大電流特性、耐高温特性に優れる炭化ケイ素(SiC)や窒化ケイ素(Si₃N₄)が注目されている。

しかし、これらの素材は硬脆材料であるため加工が困難である。基板の切断工程では、張力をかけたダイヤモンド電着ワイヤーを加工工具とし、被加工物をワイヤーに押し当て、このワイヤーを走行させることで加工している。この工程において、基板加工面に高さ 40～80 μm のうねり形状と数百 nm～数 μm の微細な条痕が生じる。これらを除去して平面基板を得るには後研磨工程で多くの材料を削る必要があり、これが歩留まり低下の要因となっている。したがって歩留まり向上のためには切断工程において条件を最適化し、切り代や加工ダメージを低減した高精度な加工を実現することが必要となる。しかし、難加工材料に対する高精度加工の実現には、加工表面の形状と性状の詳細な計測・評価により、ワイヤー送り速度やたわみ等の加工条件を最適化する必要がある。そのため、広範囲の加工面におけるマクロな形状とミクロな面性状を同時に計測・評価できるマルチスケール(MS)計測システムが求められている。

本研究ではデジタルホログラフィ(DH)を多波長化して MS 形状計測を行い、レンズ対導入による計測範囲拡大を合わせて実行することで大面積加工面の評価技術の開発を目指した。

2. 概要

まず、奥行方向の測定範囲を拡大するため、① 2 波長 FMCW-DH による Si₃N₄ 基板加工面の形状計測を行った。その後、測定面積を拡大・縮小し基板面のマクロな形状とミクロな面性状を計測するため、物体光路中に 2 枚のレンズを配置し、② 2 レンズ系を導入した拡大・縮小光学システムによる形状計測を試みた。Fig. 1 に実験光学系を示す。レンズ間距離 d を変化させることで、記録面の拡大・縮小を行った。測定対象(Object)は Si₃N₄ 基板とし、測定位置の特定のため 1 cm 四方の開口を持つマスクを貼りつけた。Fig. 2 に測定対象を示す。

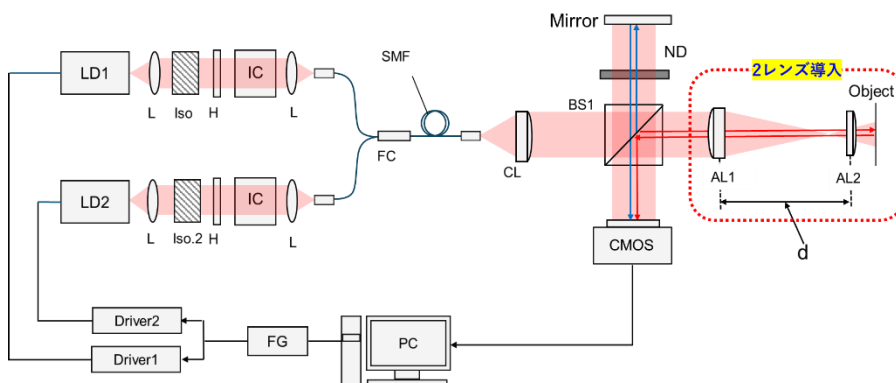


Fig. 1 2 波長 FMCW-DH 光学系 : ISO, アイソレータ; H, 1/2 波長板; IC, 強度安定化装置.

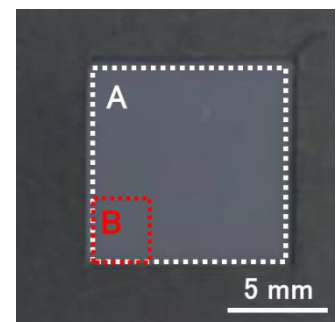


Fig. 2 測定対象(Si₃N₄ 基板).

3.研究成果および今後の課題

① 2 波長 FMCW-DH による Si_3N_4 基板加工面の形状計測

2 波長 FMCW-DH による Si_3N_4 基板加工面の形状計測を行い、基盤技術について確認した。基板加工面を計測した後、縞投影法を用いる3次元形状計測器(キーエンス社:VR-6100)による測定結果を基準として、本システムによる計測結果の整合性を調べて測定精度を評価した。各計測システムで基板を計測後、1cm 四方の領域(Fig. 1 の領域 A)について比較・評価した。Fig. 3 に本システムで計測した基板面性状を、Fig. 4 に VR-6100 で計測した基板面性状を示す。本システムで計測した表面性状は、VR-6100 の計測結果と同様の傾向を示した。一方で、本システムの計測結果には干渉性ノイズであるスペckルノイズが重畳しており、VR-6100 と比較し表面粗さが顕著に表れた。また、各計測結果における標準偏差を求めると、VR-6100 では $1.29\ \mu\text{m}$ であるのに対し、本システムでは $3.32\ \mu\text{m}$ でありことから測定精度が劣ることを確認した。これは、半導体レーザを光源とすることで生じるスペckルノイズが、奥行き方向の測定範囲を拡大するために用いた二波長法によって拡大されることが原因である。

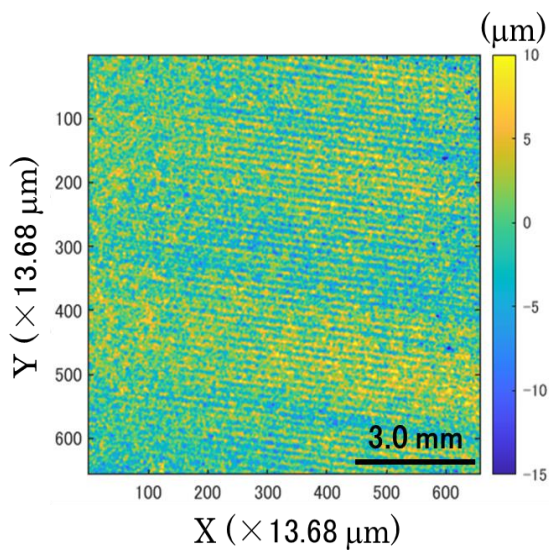


Fig. 3 基板面性状(DH).

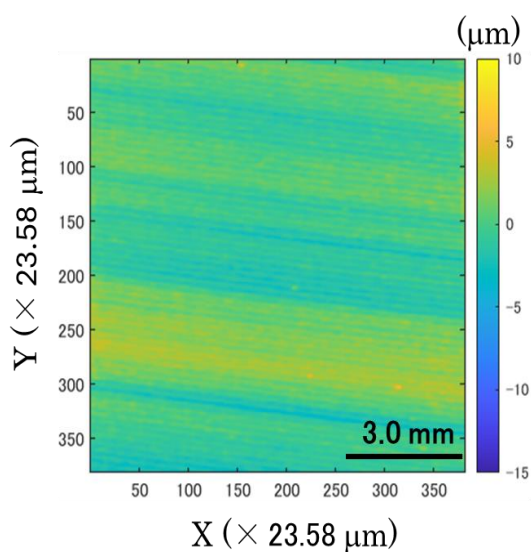


Fig. 4 基板面性状(VR-6100).

続いて、スペckルノイズが重畳した計測結果から微細な凹凸の周期構造を抽出するため、フーリエ解析を併用したノイズ処理を導入した。これはノイズ画像を2次元フーリエ変換し、空間周波数面においてノイズ除去を行うものである。Fig. 5 に2次元フーリエ解析後の特定の空間周波数成分に対応する基板面性状を示す。この処理により、周期的な縞構造が明確に現れた。この周期構造の縞間隔は $161.57\ \mu\text{m}$ であった。

VR-6100 の計測結果にも同様のノイズ処理を適用した結果、周期構造の縞間隔は $156.37\ \mu\text{m}$ となり、本システムと近い値を示した。また、これらの縞間隔は Si_3N_4 基板加工に用いるワイヤーソーの線径($160\ \mu\text{m}$)と同程度の値を持つことを確認した。よって、ノイズの有無によらず特定の周波数成分に対応する構造を取得可能であることが示された。

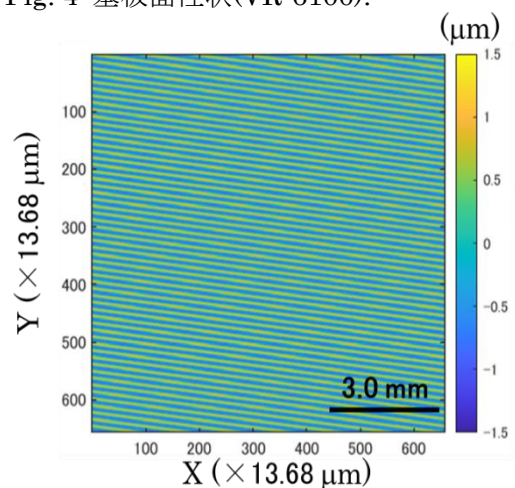


Fig. 5 フーリエ解析後の基板面性状(DH).

② 2 レンズ系を導入した拡大・縮小光学システムによる形状計測

記録物体の拡大・縮小のため、2 レンズ系を導入した倍率可変光学システムを構築した。本システムでは、記録画像が 0.9 倍から 1.1 倍まで可変となるようにレンズを選定した(これは原理確認の試験用のため倍率範囲は狭めている)。まず、USAF テストターゲットを対象とし、2 レンズ系による記録画像の拡大・縮小の機能について確認した。Fig. 6 に各倍率で記録・再生した強度画像を示す。Fig. 6 から、レンズ間距離 d の変化に伴い、記録画像の拡大・縮小を確認した。

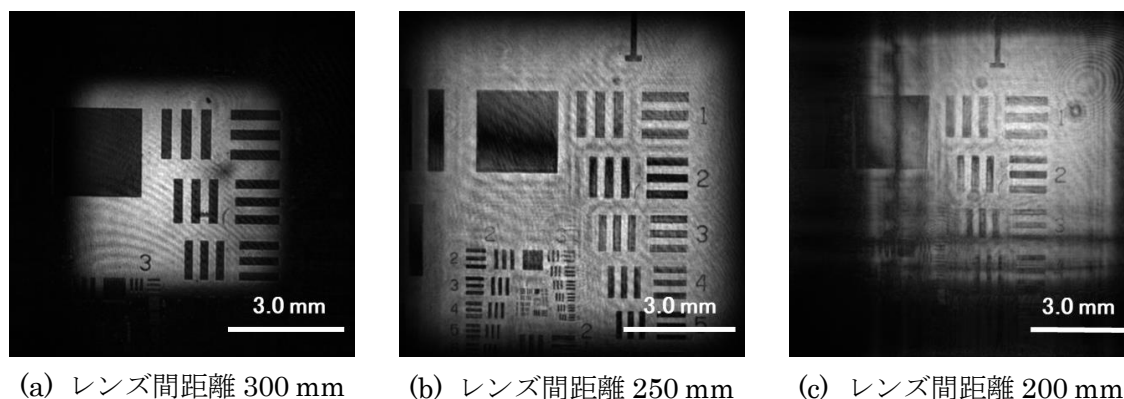


Fig. 6 拡大・縮小光学系により記録・再生した強度画像。

続いて、 Si_3N_4 基板を対象として 2 レンズ拡大光学系を用いた形状計測を実施した。この時、記録画像が 6 倍に拡大されるようレンズを選定し、 Si_3N_4 基板に設けたマスク開口の左端隅を計測した。計測後、1 mm 四方の領域 (Fig. 1 の領域 B 内) について、記録画像を拡大する前の結果と比較・評価した。Fig. 7 に基板面性状を示す。Fig. 3 と同様に、スペックルノイズの影響により表面粗さが顕著に表れた。また、①の計測結果と比較し標準偏差が 1.5 倍となり測定精度が劣化したため、フーリエ変換によるノイズ処理を施し微細構造を抽出した。Fig. 8 にノイズ処理適用後の結果を示す。Fig. 8 から周期的な縞構造が確認でき、この縞間隔は $163.78 \mu\text{m}$ であった。これは、Fig. 5 から求めた縞間隔と同程度であり、2 レンズ光学系により記録画像を拡大しても、微細な周期構造を計測可能であると考ええる。

今後は記録画像を縮小し、基板加工面全体にわたるマクロなうねり形状の計測を目指す。

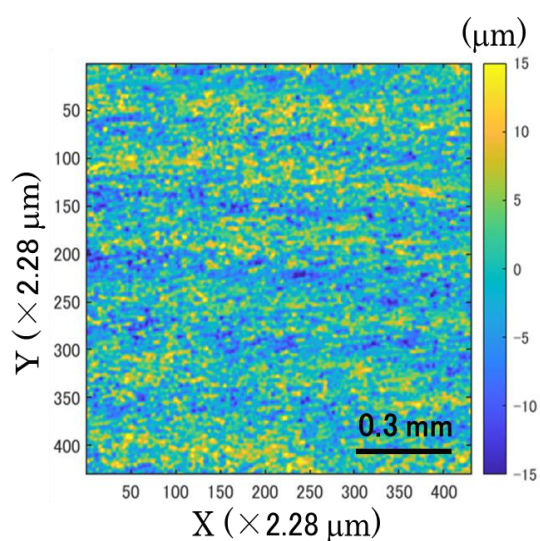


Fig. 7 基板面形状(拡大光学系 DH).

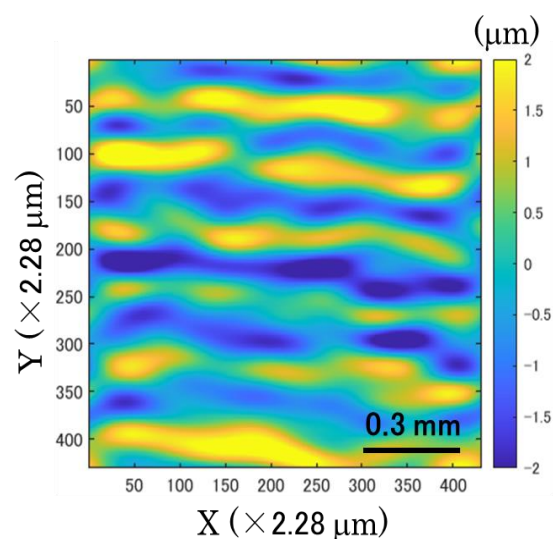


Fig. 8 ノイズ処理適用後の基板面形状 (拡大光学系 DH).

4. おわりに

本研究では、2 波長 FMCW-DH による Si_3N_4 基板加工面の形状計測を実施した。その結果、基板加工に用いるワイヤーソーの線径と同程度の周期的な縞構造を抽出した。一方で、半導体レーザを光源とすることで生じるスペックルノイズが記録画像に重畳し、他の計測手法と比較し測定精度が低下することを確認した。スペックルノイズの影響は、取得画像に対する2次元フーリエ変換を用いるノイズ処理法により軽減でき、微細な構造を可視化することが可能となった。

次に、2 枚のレンズ対を使用した拡大・縮小光学システムによる形状計測を実施した。まず、USAF テストターゲットを対象とした実験において、記録画像が拡大・縮小されることを確認した。続いて、 Si_3N_4 基板を対象とし拡大像の記録・再生を行った。その結果、等倍像を記録・再生した縞間隔と同程度の値を取得し、マルチスケール(測定範囲)計測実現の可能性が示された。

5. 本研究の今後の計画

基板面性状の測定精度向上のため、2 つの波長の組み合わせの最適化を行うと共に、スペックルノイズのさらなる低減手法について検討する。また、広い範囲のうねりを計測するため、2 レンズ光学系におけるレンズ構成を変更し、大面積かつ高精度な計測評価システムを実現する。さらに、このシステムを用いて加工条件を変えた Si_3N_4 基板の計測・評価を行い、加工条件との関連性を見出し、将来の最適化への指針を見つけることを目指す。

6. その他

(1) 出願特許(タイトル・出願番号・発明者・特許権者など)

なし

(2) 投稿論文(タイトル・学会名等)

なし

(3) 本研究会の参加企業・団体名

株式会社 新興製作所

株式会社 東洋精機製作所