

「3次元高ダイナミックレンジ形状計測を実現するダブルヘテロダイン同軸干渉計」
神戸市立工業高等専門学校 電気工学科 河合 孝太郎

1 研究の背景と目的

光計測は、非接触・非破壊で高速に厚さ等が測定可能という大きな利点を有するため、古くから様々な手法が提案されてきた。代表的な測定手法として、エリプソメトリーや分光スペクトルを用いた nm オーダーまたは μm オーダーの厚さ測定など多岐に渡る。しかしながら、各光計測手法の原理上、測定可能な厚さは限定されるために測定対象に応じた測定機器の使い分けが必要となる。

この問題の解決策として、これまでに我々は、4 光束ダブルヘテロダイン干渉法（参考：Optics Continuum 1, 2453 (2022).）を提案し、厚さが数 nm から数 mm までの様々なサンプルを 1 つの測定機器で測定可能であることを示した。本手法では、波長が僅かに異なるレーザーを同軸でヘテロダイン干渉させ、これに起因して生じる振幅変調波の包絡線の位相変化量から、サンプルの厚さ・形状を測定するものである。通常、干渉光計測においては、波長を超える位相変化を生じさせる材料（厚い材料）を測定することができないが、本手法では、振幅変調波の包絡線波長が可変であることを利用して、測定可能な厚さのレンジの大幅な向上を狙うものである。しかし本手法では、レーザー照射箇所 1 点の厚さ測定しかできず、産業需要が大きい 3 次元形状計測には応用できない問題があった。

そこで本研究は、我々が開発してきたダブルヘテロダイン干渉法を応用展開し、厚さが数 nm から数 mm の様々な測定対象における 3 次元形状を、1 つの測定装置を用いるのみで、非接触かつ高精度に測定可能な汎用的測定手法を理論と実験の両側面から確立することを目的とする。

2 研究方法・研究内容

本申請の研究で提案する手法では、ファイバースラッググレーティング (FBG) を用いて、波長 λ の光と、波長が若干異なる光（波長が $\lambda + \Delta\lambda$ ）の 2 光波を生成し、同軸でヘテロダイン干渉させることで生じる振幅変調波の包絡線を利用する。この振幅変調波の包絡線の周期 Λ はヘテロダイン干渉させる 2 光波の波長の差 $\Delta\lambda$ に依存するが、干渉させた元の光波の波長に比べて十分に大きくすることができる。この生じた振幅変調波をさらに 2 光波に分け、一方を測定対象サンプルに透過させて包絡線の位相を遅らせ、もう一方の参照波と同軸干渉させ、この時に生じる干渉光の強度分布は、測定対象の 3 次元形状を反映した明暗分布を生じる。したがって、この光強度分布をイメージセンサで検出して逆算することで、測定対象の 3 次元形状を求めることを申請当初は想定していた。しかしながら、下記 Eq. (1) に示す導出した干渉電界の解析解より、同軸干渉を用いたダブルヘテロダイン干渉により得られる光強度 I は、光波の伝搬方向の空間位置 z に依存することが判明した。

$$I = 4 \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi\Delta\lambda}{\lambda(\lambda + \Delta\lambda)} (z + nd) \right] \cos \left[\frac{2\pi\Delta\lambda nd}{2\lambda(\lambda + \Delta\lambda)} \right] \right\}. \quad (3-18)$$

なお、ここで、 λ は波長、 $\Delta\lambda$ はヘテロダイン干渉時の波長差、 n は測定対象材料の屈折率、 d は厚さである。伝搬方向の位置 z に依存しているということは、時間に依存しているということであり、検出器で測定した場合はある時間内の光強度の積分値が検出されることになる。また、光強度が時間変化は、かなりの高周波であるため、光強度の瞬時値は測定できない。よって同軸干渉を用いたダブルヘテロダイン干渉

による表面プロファイル測定は不可能と結論付け、別の新たな測定方法を検討した。

本研究で新たに提案したラインビーム走査光学系を導入したダブルヘテロダイン干渉による表面プロファイル測定で用いる光学系は、ダブルヘテロダイン干渉法の光学系の試料の前後に図1に示すようにシリンドリカルレンズを設置した構成になっている。本光学系ではシリンドリカルレンズを介して線状に集光した光を材料に入射させ、試料を透過した光を再度シリンドリカルレンズに通して光の形状を戻し、厚さの1次元分布成分を反映した干渉縞を生成させる。その後、試料を図1の座標系におけるx軸方向に動かして同じ操作を行う。これらの過程を繰り返すことにより材料の2次元厚さ分布の測定を行う。

本手法で優位性があることは、測定対象サンプル透過時に生じる光学距離が振幅変調波の包絡線の周期 Λ 以下であれば、どのような厚さの3次元形状でも測定可能になることである。また、包絡線周期 Λ は、ヘテロダイン干渉させる2光波の波長の差 $\Delta\lambda$ で制御できるため、通常の2光束干渉による厚さ測定の測定精度を維持しながら、厚さのダイナミックレンジが広い様々な測定対象の3次元形状を光学測定可能な汎用的手法が実現できる。

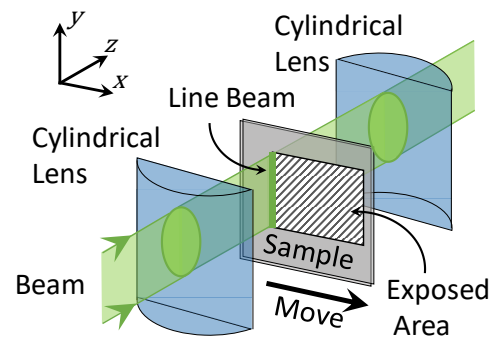


図1 ラインビーム光学系を導入したダブルヘテロダイン干渉光学系

3 研究成果

図1および図2に、理論解析により得られた試料の有無による干渉縞の変化を示す。図内の黄色の破線が試料無透過状態での干渉縞の光強度の最小値位置を表しており、試料を透過した光波を用いて生成した干渉縞の光強度の最小値の部分に赤色の破線で示している。両者の試料において、厚さが厚い位置ほど干渉縞の明暗が左側にシフトしており、光波が試料を透過した地点ごとの厚さに起因した位相変化が、干渉縞の明暗の分布に影響を与えていることがわかる。この干渉縞の位置変化量から、厚さならびに1次元の厚さ分布を求められることを見出している。なお、2次元分布を測定する際は、図1に示す光学系において、サンプルをx軸方向に動かすことで測定可能である。

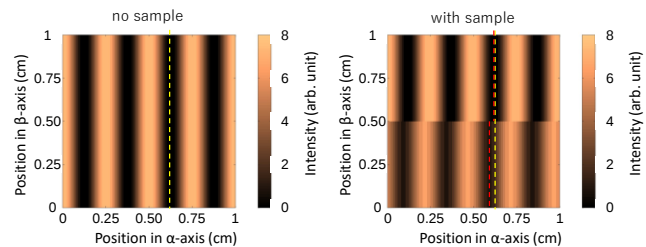


図2 提案光学系における測定結果のシミュレーション（方形波形状試料）。左図：サンプル設置前、右図：サンプル設置後の干渉縞

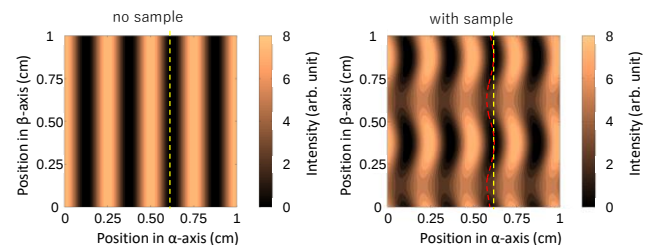


図3 提案光学系における測定結果のシミュレーション（正弦波形状試料）。左図：サンプル設置前、右図：サンプル設置後の干渉縞

また、本研究では、干渉縞の空間的変位量より逆算した試料の厚さの値と元々の試料の厚さの値との誤差を計算し、理論上最低限生じうる誤差率についての検討を行った。本測定では、干渉縞の位置変化量を測定する原理上、測定誤差が干渉縞を検出する撮像素子の最小分解能に依存することになるため、本検討を実施したものである。図4に理論検討結果を示す。絶対誤差は、ある一定周期で変化していることが読み取れる。誤差の大きさについては試料の厚さが厚い程、小さくなり、薄い程大きくなっている傾向が表れている。これは、試料の厚さが薄い程干渉縞の空間的変位が小さくなるため、撮像素子の最小分解能以下の変化量が検出できないことが要因として考えられる。誤差率は数%前後で比較的高いため、今後に誤差抑制方法の検討が必要となる。

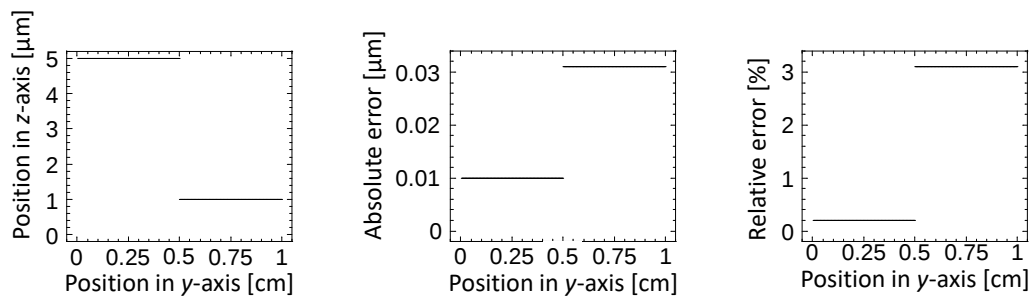


図4 提案測定法において生じる誤差率の検討結果（方形波形状試料）。左図：試料形状、中図：絶対誤差、右図：誤差率。

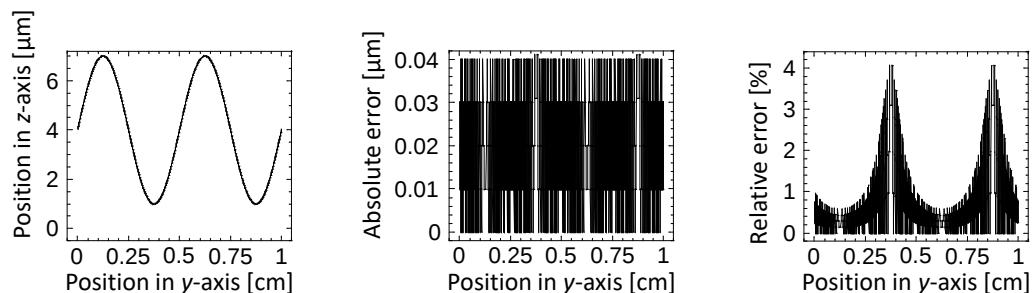


図5 提案測定法において生じる誤差率の検討結果（正弦波形状試料）。左図：試料形状、中図：絶対誤差、右図：誤差率。

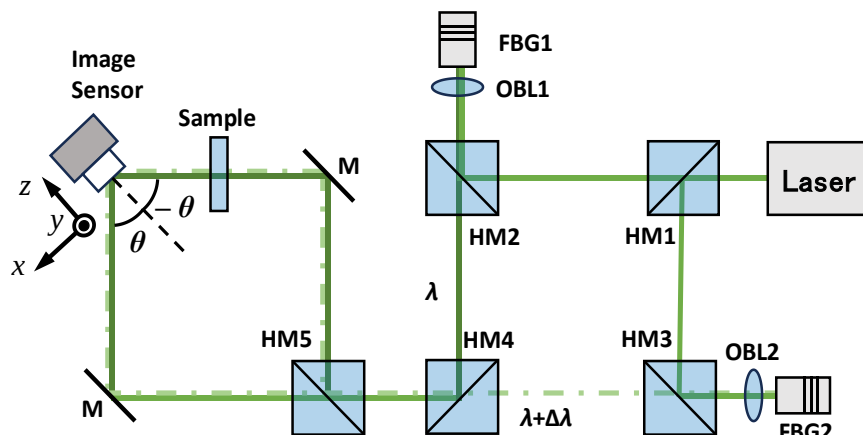


図6 ダブルヘテロダイン干渉光学系の概要図

おわりに、実際に形成したダブルヘテロダイン干渉光学系の概要図および写真をそれぞれ図6および図7に示す。本提案手法で必要となる包絡線に起因した干渉縞が形成されることを現時点で確認している。今後に実験におけるプロファイル測定の詳細を進めていく。

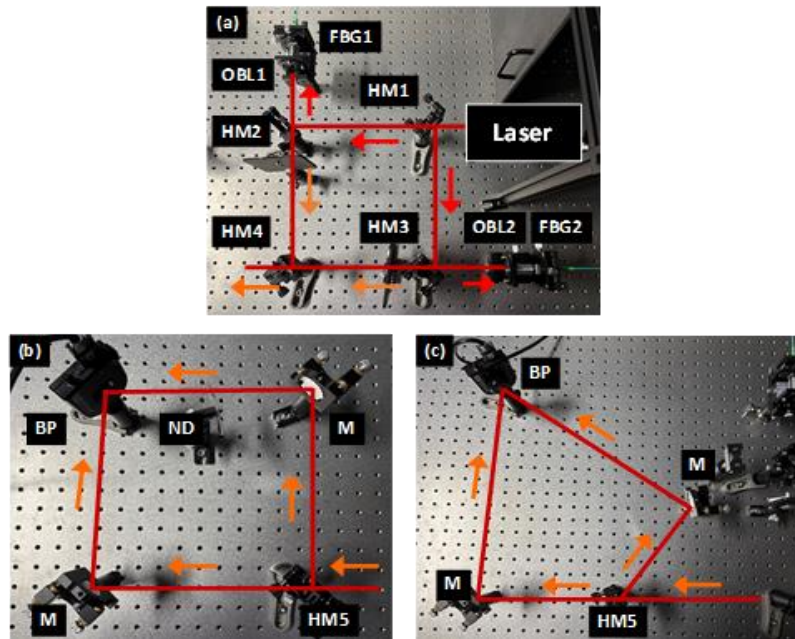


図7 形成したダブルヘテロダイン干渉光学系の写真

上記の研究成果は、下記の通り発表を行った。

1. Taiki Tanaka, Kotaro Kawai, “Theoretical proposal of double heterodyne interferometer for high dynamic thickness range surface profile measurements”, The 10th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies, (2025). 発表予定
2. 田中大貴, 河合孝太郎, “ダブルヘテロダイン干渉光学系による振幅変調波包絡線に起因した長周期干渉縞生成の実験実証” 第72回応用物理学会春季学術講演会, (2025).
3. 田中大貴, 河合孝太郎 “ラインビーム走査光学系を導入したダブルヘテロダイン干渉による高ダイナミックレンジ表面プロファイル測定”, 電気学会関西支部高専研究発表会, (2024).

4 生活や産業への貢献および波及効果

本研究での提案手法は、非接触・非破壊で高精度に厚さ等が測定可能という大きな利点を有する光計測のダイナミックレンジを拡大し、かつ産業需要が大きい3次元の形状プロファイルへの拡大も実現するものであり、将来的な産業への貢献・波及効果も高いと考える。また、産業需要が高い反射基板上の膜厚・形状測定や液晶などに代表される光学異方性材料の厚さ測定などにも応用・発展していくことが期待できる。需要に応じて、光学系を設計変更することにより、様々な需要に適用する測定手法に発展させることが可能である。