



モード同期フェムト秒レーザー共焦点 プローブの開発とその高精度化

北海道大学 大学院工学研究院
清水裕樹
東北大学 大学院工学研究科
高 偉

1. はじめに

共焦点プローブを用いた共焦点顕微鏡は、ピンホール等の点検出器により合焦点のみの信号を検出する。そのため、合焦点から外れた信号を排除する効果（オプティカルセクション効果）により、光軸方向に高い分解能を有することが知られている¹⁾。また、色収差を有する対物レンズや回折型フレネルレンズと広帯域光源からなる色収差共焦点プローブでは、反射光の分光分析で観測されるピーク波長から測定点の高さ情報を得ることが可能で、光軸方向に対してスキャンレスの計測を実現できることから、その適用範囲を拡大している²⁾。この色収差共焦点プローブでは、用いるレンズの分散特性と光源スペクトル幅によって光軸方向の測定レンジが制約されることから、キセノンランプのようなスペクトルの広い白色光源が用いられることが多い。しかしながら、白色光源の低い空間コヒーレンスとスペクトル変動が測定精度を低下させる要因となりうる。これに対し、各モードが一定の光周波数間隔で並ぶスペクトルを有するフェムト秒レーザー光源は、空間コヒーレンスが高く、極めて安定なスペクトルを有する³⁾ことから、色収差共焦点プローブの光源として適するものと考えられる。さらに、モード同期をすることで、長さ基準にトレーサブルな共焦点プローブの実現も期待される。フェムト秒レーザーのスペクトル幅は比較的狭いが、フェムト秒レーザーパルス为非線形フォトニック結晶ファイバに結合してスペクトル幅を拡大したスーパーコンティニューム光を用いることで、共焦点プローブに用いた際の光軸方向の測定レンジを拡大できる⁴⁾。一方で、フェムト秒レーザー光源は、非線形パルス形成効果によって引き起こされる Kelly サイドバンドなどによる不均一なスペクトルを有することが知られている⁵⁾。この不均一なスペクトルは色収差共焦点プローブにおけるピーク波長検出の精度に影響し、結果として測定精度向上の妨げとなる。

このフェムト秒レーザーの不均一スペクトルの影響を低減し、高精度な測定を実現する「フェムト秒レーザー共焦点プローブ」が開発されている⁶⁻¹⁰⁾。合焦条件の異なる1対の検出器を有する光学系に、独自の合焦波長検出アルゴリズムを組み合わせることで、高精度な軸方向変位検出が実現されている。本稿では、フェムト秒レーザー共焦点プローブ光学系の概要について述べるとともに、合焦波長検出アルゴリズムについて説明する。

2. デュアル検出共焦点光学系によるコンフォーカル信号スペクトルの生成

デュアル検出器光学系を採用したフェムト秒レーザー共焦点プローブ光学系の模式図を図1に示す⁷⁾。コリメートされたフェムト秒レーザーは、偏光ビームスプリッタおよび1/4波長板を通過して円偏光となった後、色収差レンズにより測定対象面上に集光される。ここで、波長 λ のモードに対する対物レンズの焦点距離 f は、以下のように表すことができる¹¹⁾。

$$\frac{1}{f} = (n_l - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$