

誘電体ガラス基板のフェムト秒パルスレーザー加工における マルチタイムスケール時間分解複素透過率イメージング Multitimescale Time-Resolved Complex Optical Field Imaging of Femtosecond Pulsed Laser Processing of Dielectrics

東大院理

○川野 将太郎、戸田 圭一郎、櫻井 治之、小西 邦昭、井手口 拓郎

Graduate School of Science, The Univ. of Tokyo

°Shotaro Kawano, Keiichiro Toda, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Takuro Ideguchi

E-mail: s-kawano518@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

非接触で微細な自由形状造形が可能な超短パルスレーザー加工の制御性の更なる向上のためには、フェムト秒からマイクロ秒に及ぶ長大な時間領域で展開されるアブレーションダイナミクス[1]の原理の探求が重要である。近年、ポンププローブ法に基づく時間分解デジタルホログラフィ(Time-Resolved Digital Holography, TRDH)を用いた時間分解複素透過率イメージングにより、加工に伴うパルス光と物質の相互作用を、各時間遅延におけるプローブパルス光の透過率と位相遅れ(Optical-Phase-Delay, OPD)として直接観測する試みがなされている[2,3]。特に OPD 画像は、電子励起などの初期過程のみならず、アブレーション後に物質内部に残留する応力や熱による屈折率変化を可視化できるため、高繰り返しフェムト秒パルス加工で課題とされる熱蓄積[4]などの重要なプロセスを直接観測できる可能性を有している。

我々はこれまでに、BK7 ガラス基板の紫外超短パルス光(波長 257 nm、パルス幅 200 fs)による単一パルス加工について、加工パルス光による電子励起から物質除去までの一連の現象を反映した、サブピコ秒から数ナノ秒の各時間遅延における複素透過率画像の取得に成功している[5]。特に、加工痕形成後のナノ秒領域における形態変化に起因しない複素透過率変化は応力や熱に由来する信号と考えられ、より遅いマイクロ秒以降の時間領域で消失すると予想される。しかし、単一のパルス光をポンプとプローブの二つに分離し、ディレイラインにより光学遅延を設ける従来の方式では、光学系の長大化とそれによる光路調整の煩雑化などにより、マイクロ秒の時間遅延領域の観測は困難である。このような長い時間遅延を実現する方法の一つとして、異なる二つの光源間の電氣的時間遅延制御が挙げられる。この手法では、ポンプパルス光に対するプローブパルス光の出射タイミングを時間遅延発生器で制御することで、光路長を掃引することなく、光源の外部トリガー信号に対する電氣的ジッターの精度で大きな時間遅延を実現できる。

本研究では、パルス幅 1 ns の Yb 添加ファイバーレーザーをプローブ光源として導入した(Fig.1)。フェムト秒ポンプパルス光源のオシレーターをクロック源として二つの光源を電氣的に同期し、時間遅延発生器により両者の出力タイミングを制御することで、時間分解能 1 ns、ジッター 200 ps 未満でのナノ秒時間分解複素透過率イメージングを実現した。本光学系で取得された加工穴形成後の時間分解 OPD 画像及び透過率画像を Fig.2 に示す。加工パルス光入射から 100 μ s より遅い領域まで OPD・透過率ともに有意な変化が確認された。これにより、これまで実験的に観測が困難であった加工痕形成後の緩和過程を議論することが可能となる。

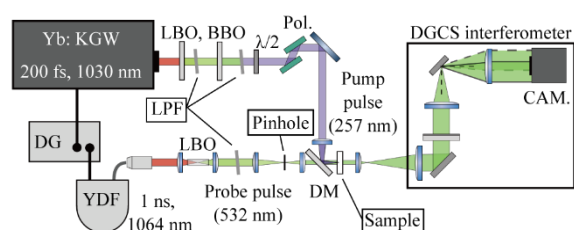


Fig. 1 Schematic of our ns-resolved TRDH system with DGCS (diffraction-grating-based common-path shearing) interferometer. DG: delay generator; Pol.: polarizer; DM, dichroic mirror; LPF: low-pass filter.

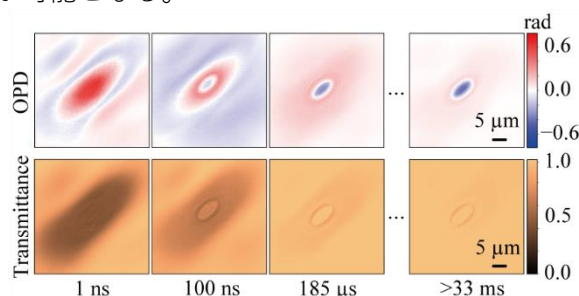


Fig. 2 Time-resolved OPD and transmittance images of a crater on a BK7 glass substrate ablated with 6- μ J single pulses. The right most panels show images of the crater after the processing.

- [1] R. R. Gattass & E. Mazur, Nat. Photonics **2**, 219 (2008).
[2] Y. Hayasaki *et al.*, Sci. Rep. **7**, 10405 (2017).
[3] B. Momgaudis *et al.*, Opt. Express **27**, 7699 (2019).

- [4] H. Shen *et al.*, J. Heat Transfer **143**, (2021).
[5] S. Kawano *et al.*, 2022 IPC, IEEE Xplore, ThG1.3.