

繰返しパルス照射による光学材料のレーザー損傷しきい値

¹本越伸二・²吉田実・³小川遼・⁴藤岡加奈・⁴吉村政志・⁴實野孝久・³森勇介

¹レーザー総研・²近畿大学・³阪大工学研究科・⁴阪大レーザー研

初めに

ミラー、レンズなどの光学素子に高強度を持つレーザー光を照射すると、破壊現象を引き起こすことがある。これを「レーザー損傷」と称し、高出力レーザー装置の性能を制限する大きな要因になっている。多くの研究機関、光学素子メーカーでは、レーザー損傷の発生する最低エネルギー密度（レーザー損傷しきい値）を上げる努力が日々行われている。

1パルスによるレーザー損傷しきい値に比べて、繰返しパルスでは低いしきい値となる[1]。しきい値の低下は、繰返し周波数、照射パルス数に依存し、半分程度にまで下がることが報告されている。その原因については、熱の蓄積、応力や歪み、微小損傷、欠陥生成など、様々な議論がされている。ナノ秒パルスレーザーの研究では、薄膜材料の吸収係数や熱伝導率の違いが損傷しきい値の低下と関係があることから、熱蓄積によるものとまとめている[2,3]。しかしながら、近年、急速に利用が進んでいるフェムト秒パルスレーザーにおいても、繰返しパルスにより損傷しきい値が低下することが報告されている[4]。フェムト秒パルスレーザーは、高いパルス強度を持つが平均エネルギーは低いため、上記のような熱の蓄積ではないと考えられる。

我々は、熱以外の損傷しきい値低下原因を明らかにするために、時間間隔を変えた2パルスによる石英ガラス内部のレーザー損傷しきい値を評価した。

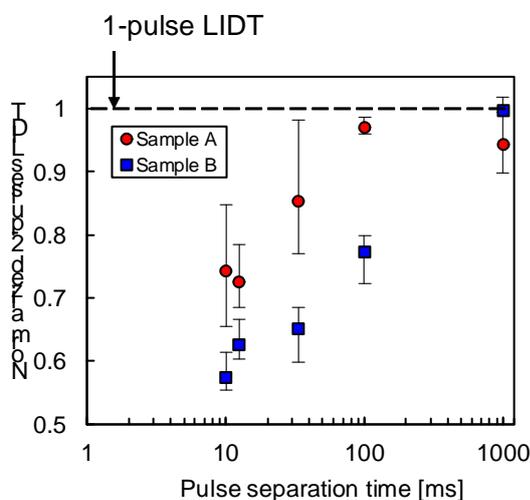


図1 異なる間隔の2パルスに対する石英ガラス内部損傷しきい値[5]

その結果、図1に示すように、2パルスの損傷しきい値は、パルスの時間間隔が短くなるに従い低下し、その変化は石英ガラス内の不純物濃度が多いほど大きくなることを示した[5]。また、その損傷しきい値の低下の割合は、繰返しパルス照射による透過率低下と強い相関があることを明らかにした[5]。この結果は、2パルス照射によるレーザー損傷しきい値の低下の要因は、透過率低下と同じレーザー誘起欠陥によるものであることを示唆している。

一方、ガラス材料内に生じた欠陥は、照射終了後、長時間かかり消滅し、元の透過率に戻る。また欠陥消滅の時間はガラス温度に依存し短くなることが報告されている[6]。

本研究では、高温条件下において欠陥の再結合を促進し、石英ガラスの透過率低下を抑制することを目的に、加熱保持した石英ガラス材料への繰返しパルスレーザー照射試験を行った。

評価方法

図2に透過率測定実験の光学配置図を示す。照射レーザー光源にはArFエキシマレーザー(波長193nm, パルス幅10ns, 繰返し周波数100Hz)装置を用いた。レーザーパルスは焦点距離500mmのレンズを用いてサンプル表面より8mm内部で、エネルギー密度0.5 J/cm²になるよう調整した。繰返しパルス照射時の入射、透過エネルギーを計測し、透過率変化を評価した。サンプルには合成石英ガラス(25×30×24mm³)を用意し、ヒーター上に設置した。レーザー照射前のサンプル表面温度を輻射温度計にて計測し、常温、100℃、150℃、200℃の順番に加熱を行い、それぞれの温度において20,000パルス照射し透過率を計測した。また、200℃の試験終了、自然冷却の後、加熱後常温として再試験を行った。

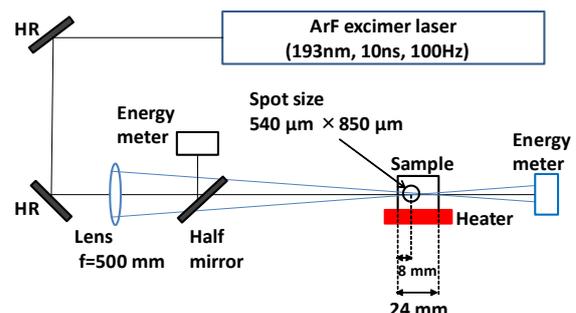


図2 繰返しパルス照射による石英ガラス透過率測定の実験配置図

測定結果

図3に測定結果を示す。図の透過率は、照射開始時で規格化した値である。石英ガラスの保持温度に関わらず照射パルス数の増加に従い透過率は減少した。20,000パルス照射後、常温では照射開始時の82%まで透過率が減少するのに対して、100°C加熱保持では94%の低下に抑えられた。これは予測していた加熱により欠陥再結合が促進されたことを示している。しかしながら、更に保持温度を150°C、200°Cに増加した場合では、温度増加に伴い透過率低下は大きくなる結果となった。つまり、石英ガラスの透過率低下を抑制するためには、最適な保持温度があることが明らかになった。更に、加熱後常温時の測定では、加熱前常温に比べ、透過率低下は約8%抑制されている。この結果は、石英ガラスの加熱の効果は欠陥の再結合の促進だけでなく、欠陥が生成しにくい改質することを意味している。今後詳細な分析、評価が必要である。

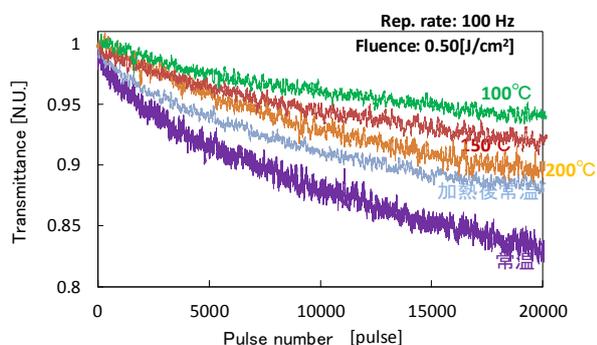


図3 繰返しパルス照射時の石英ガラス透過率の変化

まとめ

紫外線レーザー照射により生成される石英ガラス内部の欠陥について、レーザー照射時のガラス保持温度との関係を評価した。レーザー誘起欠陥の生成を抑制する最適な温度があることが分かった。また、一度加熱した石英ガラスは常温においても欠陥が生成されにくくなることが分かった。

謝辞

本研究は、大阪大学レーザー科学研究所共同研究課題として行われました。熱心な議論を頂いた諸先生に謝意を表します。

参考文献

- [1] J.-Y.Natoli, et al., *Opt. Lett.*, **30**, 1315 (2005).
- [2] 本越伸二他、*核融合研究* **68**, 243 (1992).
- [3] S.Motokoshi, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, L1530 (1994).
- [4] K.Starke, et al., *Proc. of SPIE*, **5273**, 388 (2004).
- [5] Y. Takemura, *et al.*: Extended Abstracts of the 24th Congress of the International Commission for Optics, Tokyo, Th2C-05 (2017)
- [6] 豊田新：地球化学, **32**, 130 (1998)