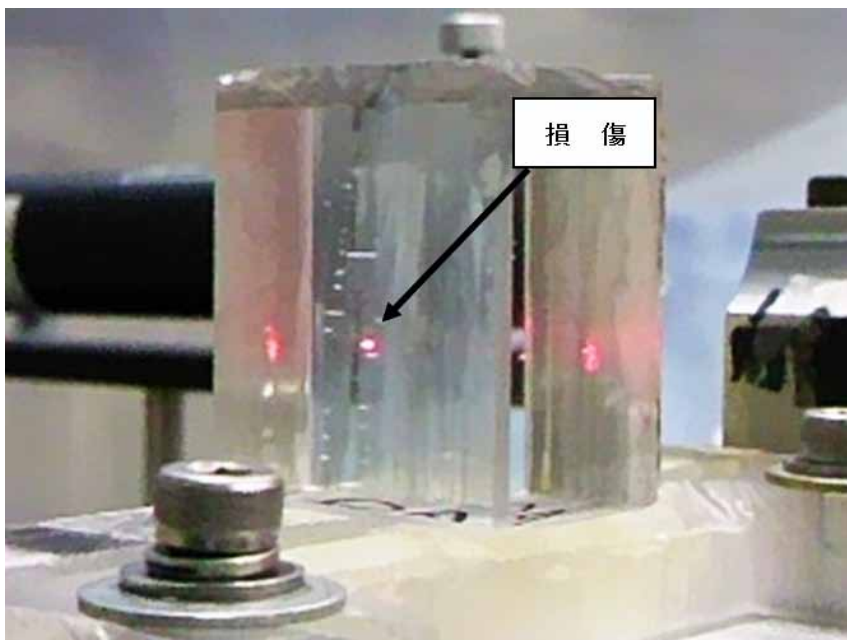


CONTENTS

■ 繰返しパルスによる光学素子のレーザー損傷
■ 2016 International Symposium
on Extreme Ultraviolet Lithography
■ 主な学会等報告予定



【表紙写真】石英ガラス内部損傷の様子

繰返しパルスによる光学素子のレーザー損傷

レーザー技術開発室 本越伸二

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。レーザー技術総合研究所では、レーザー損傷耐性試験を実施し、高耐力光学素子開発の支援を行っている。現在、多くの試験は1パルスレーザー光によって行われているが、産業応用では繰返しレーザーパルスが使用されている。そのため、繰返しパルスによるレーザー損傷耐性試験への要求もあり、準備を進めている。

繰返しパルスによる光学素子のレーザー損傷につい

ては、すでに多くの論文等で報告されている。また、国際標準(ISO)規格にも「S-on-1試験」(Sはパルス数)として試験方法が標準化されている。

本稿では、繰返しパルスによるレーザー損傷耐性試験を行うに当たり、2パルスのレーザー光を用いた基礎研究について紹介する。

●繰返しパルスによる損傷過程

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。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、さまざま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

次ページへつづく▶



繰返しパルスによる光学素子のレーザー損傷

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。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。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はないと考えられる。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パルスによるレーザー損傷しきい値を評価した。

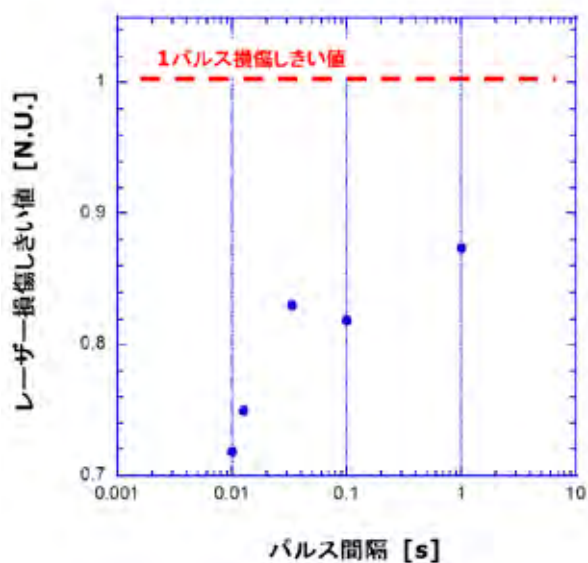
照射レーザー光源には、波長193nm、パルス幅10nsのArFエキシマレーザー装置を用いた。評価試料には、合成石英ガラス(20×30×30mm³)を用意した。合成石英ガラスのバンドギャップエネルギーが8～9eVであるのに対して、193nmの光子エネルギーは6.4eVである。そのため、2光子で容易に伝導帯に電子を励起することができる。レーザー光は焦点距離100mmのレンズを用いて、石英ガラス内部に集光照射する。損傷しきい値は、照射位置を固定し、低いエネルギーから徐々にエネルギーを増加し、損傷が発生するエネルギー密度として求めた(N-on-1試験)。通常は、照射1パルス毎に損傷の有無を確認しつつエネルギーを増加するが、今回は時間間隔10ms～1sを空けた2パルスを1セットとして、損傷の有無を確認した。損傷の確認は、照射時の石英ガラス内部からのプラズマ発光と、エキシマレーザーと同軸にアラインメントされたHe-Neレーザー光の散乱により行った。表紙写真は、損傷発

生時のHe-Neレーザー光の散乱の様子を示している。

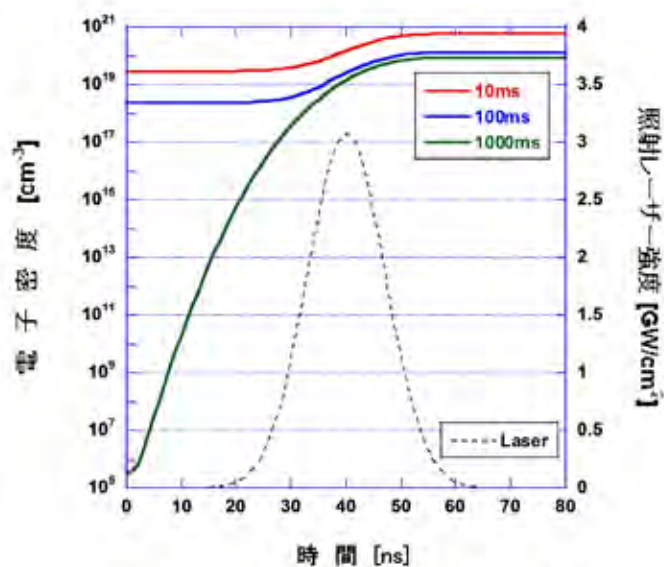
●2パルス照射による損傷しきい値

図1に2パルス照射により測定された損傷しきい値の結果を示す。横軸には、2パルスの時間間隔、縦軸のレーザー損傷しきい値は、あらかじめ測定した1パルスの損傷しきい値で規格化している。2パルスによる損傷しきい値は、パルス時間間隔が短くなるに従い低下した。この低下は、純度の異なった石英ガラスにおいても確認された。わずか2パルスですら損傷しきい値が低下することから、熱の蓄積や、応力によるひずみが原因ではないと考えられる。また、1パルス目で微小損傷が発生したとすると、2パルス目にはその照射時間にかかわらず同じエネルギー密度で損傷が発生しなければならない。そのため、微小損傷が損傷しきい値低下の原因ではないと結論づけられる。この結果より、レーザー照射による欠陥生成が2パルス照射時のしきい値低下の原因と考えられる。

紫外光照射によるガラス材料の欠陥生成については、ダークニング、カラーセンターと呼ばれ、多くの論文等でも紹介されている。通常は、長時間照射することにより、紫外-可視領域の透過率の低下、蛍光の発光として確認される。欠陥生成は、レーザー損傷しきい値より十分に低いエネルギー密度でも起こり、照射を中止すると時間とともに緩和することが特徴である。しかし、欠陥生成とレーザー損傷との関係については、明らかにされていない。



【図1】2パルスレーザー照射によるレーザー損傷しきい値



【図2】2パルス目照射中の石英ガラス内部の電子密度計算結果

●欠陥生成と電子放出モデル

欠陥生成がレーザー損傷に影響を及ぼすモデルを検討した。一つは欠陥準位による吸収、もう一つは欠陥生成と同時に起こる自由電子の放出である。欠陥が生成されると透過率が減少し蛍光を発することから、照射前には存在しなかった欠陥準位が形成され、容易に紫外レーザー光を吸収し損傷を引き起こす。しかし、近赤外域のレーザーパルスでも繰返し照射で損傷しきい値が低下することから、生成された欠陥準位が十分に低いエネルギー準位であり、近赤外域においても吸収する必要がある。これまでの欠陥生成の報告から、吸収が現れる波長域は500nm以下であることから、吸収による損傷ではないと考えられる。

欠陥生成時に放出された電子は、欠陥の緩和過程時に再結合し、初期の状態に戻る。繰返しパルスの場合、次のパルスが入射するまでに緩和できずに残留した電子は、レーザー光からエネルギーを得て、衝突電離を繰返し、絶縁破壊に至る。このモデルに必要なのは、欠陥の緩和時間である。石英ガラスの絶縁破壊に必要な自

由電子密度を 10^{20} 個/cm³と仮定し、図1の実験結果を元にレート方程式を立てて、2パルス目照射前に必要な残留電子密度を求めた。図2には、パルス間隔を10～1000msとした場合に2パルス目照射中に増加する電子密度を示してある。レーザー照射密度はそれぞれのパルス間隔時のレーザー損傷しきい値で計算を行った。その結果、緩和時間約20msの時に、絶縁破壊臨界密度に至ることがわかった。

●今後の展開

繰返しレーザー照射時のレーザー損傷しきい値の低下要因について検討し、欠陥生成と同時に放出される自由電子が寄与していることを紹介した。この研究は、まだ初期段階であり、今後、異なった材料を用いた試験や、レーザー照射条件の変更等により、レーザー損傷のさらに詳細な物理を検討していく。本研究結果は、高耐久かつ長寿命の光学素子開発に有益な知見をもたらすものであり、実際の素子開発にもその成果を生かしていく予定である。

REPORT

2016 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography

■EUVリソグラフィーに関する国際会議

極端紫外リソグラフィー(EUV Lithography)の国際会議が2016年10月24日～26日まで広島平和記念公園内の広島国際会議場で開催された。本会議は極端紫外リソグラフィーの全分野をカバーし、年一回、世界各国から関係者が集まり議論する会議である。これまで極端紫外リソグラフィーの課題とされてきたEUV光源出力の低さが克服されつつあり、5年以内の半導体製造への導入の見通しが高まるなかで開催された今年の会議には、アジアパシフィック211名、欧州56名、米国62名の計329名が出席し、例年以上の盛り上がりを見せた。会議参加者数は一昨年在267名、昨年在303名であり、ここ数年のEUVリソグラフィーの盛り上がりは会議参加者数を見ても明らかであるといえる。

■EUV光源開発状況

EUV光源に関しては世界の二大光源開発メーカーである米国Cymer社と日本のギガフォトン社からそれぞれ発表があり、ともにEUV光源は平均で100W以上

理論・シミュレーション研究チーム 砂原 淳

のレベルで長時間安定して稼働できていることが報告された。また、ギガフォトン社からは世界最高の5%のEUV変換効率で光源の安定稼働が報告され、レーザー



【写真1】広島平和記念公園の慰霊碑

総研、大阪大学など、ギガトンと光源開発の共同研究を進めてきた立場としては光源開発の進展ぶりを実感する会議ともなった。EUV光源のピーク出力はすでに200Wレベルに到達しており、光源出力に関しては目標を達成しつつあるとの認識が広がっている。そのため目下の光源の課題は光源出力よりも装置の稼働率(availability)であり、availabilityをいかに高めるかに焦点が当てられてきている。現在のavailabilityは70%程度であり、これをどこまで高められるか、光源の安定性、ドロップレットジェネレーターや光学素子の寿命、メンテナンス時間の短縮など、光源装置全体の技術力が問われてきている。

■EUVマスク技術

レジストやマスク分野も数々の進展が報告され、量産光源が現実のものとなってきている印象を大いに受けた。ただし、マスクへの粒子付着を避けるために使われるペリクル膜に関しては、量産光源で想定される200WのEUV出力レベルに耐えるものが未だできておらず、会議のサマリーにおいてもFocus areaとして発表された。高耐力ペリクル膜についての開発状況は今後注目すべき事項である。

■おわりに

以上のように、EUVリソグラフィーは未だ開発課題は多くあるものの、半導体製造現場への導入に向けての見通しは明るくなってきている。会議にはインテルやTSMC、Samsungなど世界の半導体製造メーカーも多く発表し、5ナノメートルプロセスへのEUVリソグ

ラフィー導入が見えてきている。現在の半導体はエキシマレーザーを光源とした多重露光により作られているが、製造プロセス数の増大が直接的に製造コストの増大につながっている。製造コストの増大を避けつつ回路線幅の細線化が進むのか、細線化のペースは落ちたものの、ムーアの法則の流れはさらに続いていくのか、EUVリソグラフィーの導入の成否が鍵を握っている。



【写真2】広島平和記念公園内の平和記念資料館にある地球平和監視時計。上段の数字は広島への原爆投下からの日数、下段は最後の核実験からの日数。2017年、世界の動向はどのようになるでしょうか

主な学会等報告予定

- 3月7日(月)～9日(水) The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2017)(福井大学)
李 大治 「Terahertz radiation from a grating structure with graphene」
- 3月8日(水) 第42回リモートセンシングシンポジウム(千葉大学)
染川智弘 「コヒーレント白色光を用いた長光路差分吸収分光法による大気中CO₂の計測」
- 3月14日(火)～17日(金) 応用物理学会春季講演会(パシフィコ横浜)
李 大治 「Radiation induced by graphene surface plasmon polaritons」
染川智弘 「水中レーザーリモートセンシングに向けたラマンライダーの開発」
ハイク コスロービアン 「Polarization properties of corner-cube and axicon retroreflectors」
- 3月16日(木)～19日(日) 日本化学会 第97春季年会(慶應義塾大学日吉キャンパス)
谷口誠治 「液中レーザーアブレーション法による還元金属ナノ粒子の作製」
- 4月18日(火)～21日(金) The 6th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'17)(パシフィコ横浜)
ハイク コスロービアン 「Quantitative analysis of CW-regime, multi-pass amplifier output characteristics including optical losses」
本越伸二 「Laser-induced damage in silica glasses with double pulses irradiation」

—連載終了のお知らせ—

本誌連載コラム「光と蔭(山中千代衛)」は筆者逝去のため2016年12月号掲載分をもちまして終了させていただくこととなりました。連載232回、20年以上の長きにわたりご愛読いただきまして誠にありがとうございました。