

自由電子レーザー照射によるガラス内へのナノ構造生成の試み

Synthesis of nanostructure in glass irradiated by free electron laser

○野平 真義¹, 岩田 展幸²Masayoshi Nohira¹, Nobuyuki Iwata²

Abstract: It has been confirmed that a periodic structure is generated in the crystal when a linearly polarized ultrashort pulse laser beam is focused and irradiated into the crystalline SiO₂^[1], and a theories and applications such as five-dimensional optical storage have been studied. We irradiated Crystalline SiO₂ and SiO₂ Base samples with a free-electron laser which pulse width of 200 fs with linearly polarized light at 800 nm 1600 nm 2000 nm, 3500 nm wave length. Ablation was observed each sample at 3500 nm wave length. Especially periodic structure was observed at ablation back yard in SiO₂ base sample

1. 背景

昨今の高度情報化社会に伴い、現代で生み出される多くの芸術や文学、映像がデータという形で各地の端末に保存されている。しかし、イタリアのサンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂とは違いそのようなデータは電源喪失や記憶装置の破損によって損なわれる恐れがある。そのため、現在では特に貴重な映像や、文化的資産を磁気テープに記録し温度、湿度が厳重に管理された保管庫に保存されている。磁気テープの記録容量は201 Gb/in²[2]にも上る。しかし長期間の保存に必要な管理は厳格であり、維持費は巨額になる傾向がある。その中で、注目されているのが5次元光記録である。5次元光記録では記録媒体はガラスなどの透明誘電体などに保存する為、長期保存に向いておりまた記憶容量もテープと比べ大きくすることができるからである。Ti:Sapphire レーザでは偏光に応じたナノ回折格子が生成されることが確認されており^[1]、近年では書き換え可能であることも示された^[3]。我々は、自由電子レーザーを用いて各試料内にナノ構造が生成を試みた。

2. 目的

自由電子レーザー (FEL)を用いて集光しガラス内にナノ構造を生成することを試みる

3. 実験方法・評価方法

SiO₂(300 nm)/Si 基板, 人工水晶基板(AT カット, ST カット)の三種類を用いた。FELにはマイクロパルス(uP), マクロパルス(MP)があり, uPのパルス幅は約200 fs, パルス間隔は約350 psである。MPは9.8 usほどであり, その中にuPが約440パルス存在する。

試料に対し直線偏光を加えた FEL を用いて集光を行い試料内に照射した。この時波長は800 nm, 1600 nm,

2000 nm, 3500 nm の4種類を用い, 照射時間は各試料で30分照射を行った。

また3500 nmでは焼灼が確認されたため試料を掃引し1 MPでの焼灼痕を付けた。この時のエネルギーはそれぞれの波長で70 uJ/MP, 700 uJ/MP, 1.4 mJ/MP, 2.7 mJ/MPであり, それぞれのuPのエネルギーを計算すると, 0.74 MW, 7.4 MW, 15 MW, 29 MWであった。試料に対して光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡(SEM)を用いてナノ構造の観察を行った。

4. 結果

800 nm, 1600 nm, 2000 nmの照射では焼灼は確認できなかった。3500 nmではすべての試料で焼灼を確認した。

Figure 1に(a)AT-カット, (b)ST-カット人工水晶に生成された焼灼痕の光学顕微鏡像を示す。

Figure 2はSiO₂/Si基板にFELを照射したときの(a)光学顕微鏡像と(b)SEM像である。SEM画像では焼灼痕奥側に二つ穴の特徴のある構造を確認した。二つ穴短径の大きさは3.5 μmほどであった。

Figure 3はそれぞれ別の点において1 MPを照射し焼灼した時の画像である。この場合においても二つ穴の構造が確認された。Fig. 2の二つ穴構造は最初の1 MPにより生成されたと考えられる。

5. 議論

人工水晶基板やSiO₂/Si基板に焼灼が発生したのは多光子吸収と逆制動放射により, 価電子帯から導電帯へ電子が励起される。その後の励起された電子がクーロン衝突を起こすことによりフォノンが励起され, 温度が上昇し焼灼に至った^[4, 5]と考える。上記焼灼メカニズムに従うと人工水晶基板のカット面と焼灼痕については関係ないと考えられる。そのほかの波長において焼灼

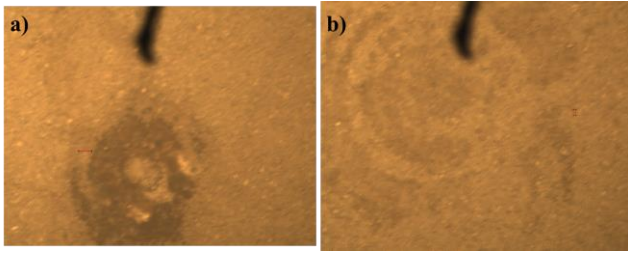


Figure 1. Optical microscope images (400x) of (a) AT-cut and (b) ST-cut quartz substrates after 3500 nm FEL ablation.

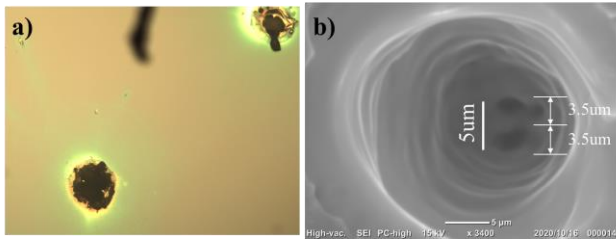


Figure 2. (a) Optical image (400x) and (b) SEM image after 3500 nm FEL ablation to the SiO₂/Si substrate. At the bottom of the ablation particular structure was observed.

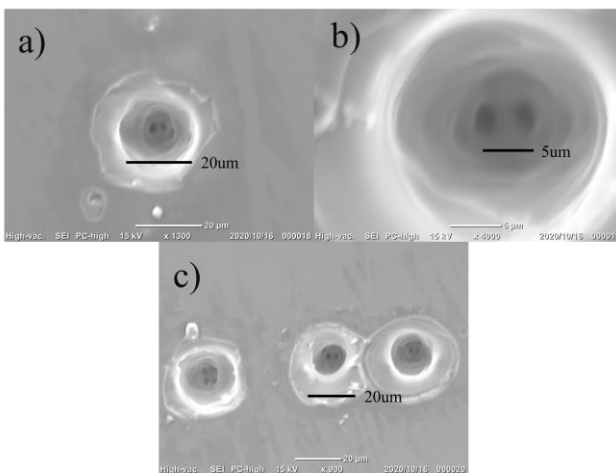


Figure.3 Ablation image by ablated 1 MP

SEM image took nanostructure which ablated by 1 MP by another place. each magnification is (a)1300x, (b)4000x, (c)900x. At the bottom of the ablation particular structure was observed. Direction of grating changed from Figure.2 by changing sample direction

が発生しなかった理由として、レーザ光量が足りなかったことが考えられる。1 MP 照射時の焼灼痕にも確認できていることから、30 分の長時間照射においては最初の 1 MP によって焼灼と二つ穴構造が作成されたものと考えられる。

これは、前述の過程で励起された電子によって電場が発生し、入射光の光場と電磁場の干渉により、電子密度の濃淡⁵⁾が発生する。その濃淡により励起される電子の密度が不均質となり加熱される部分とされない部分が発生し二つ穴構造が発生したものとする。

George D. Tsibidis ら⁵⁾はこのモデルに基づいて数値計算を行っており、波長 3500 nm では二つ穴の間隔は 3.5 μm ほどとなっていた。

6. まとめ

結晶性ガラス基板とシリコン酸化膜基板に自由電子レーザを集光して照射した。人工水晶基板とシリコン酸化膜基板では波長 3500 nm において焼灼痕を確認した。シリコン酸化膜基板で SEM による表面観察を行ったところ焼灼痕奥側に波長程度の格子間隔を持つナノ構造が観察された。これは、励起された電子場と光場の干渉により発生した電子密度の濃淡により生成したと考えている。

7. 参考文献

- [1] Yasuhiko Shimotsuma, Peter G. Kazansky et al.: Self-Organized Nanogratings in Glass Irradiated by Ultrashort Light Pulses, physical review letter, vol 91, No.24, pp.247405-1, 2003
- [2] Sony Develops Magnetic Tape Storage Technology with the Industry's Highest Recording Areal Density of 201 Gb/in², Sony Storage Media Solutions Corporation, 8/2017
- [3] Haodong Wang, Juan Song, et al.: Formation of nanograting in fused silica by temporally delayed femtosecond double-pulse irradiation, journal of physics, vol.51, No.155101, pp.7, 2018
- [4] Martin Ams, Graham D. Marshall et al.: Investigation of Ultrafast Laser-photonc Material Interactions: Challenges for Directly Written Glass Photonics, IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics, vol. 14, No.5,8/2008
- [5] George D. Tsibidis, Emmanuel Stratakis: Ionization processes and laser induced periodic surface structures in dielectrics with mid-infrared femtosecond laser pulses, SCIENTIFIC REPORTS,10:8675, 2020
- [6] Sören Richter, Matthias Heinrich et al.: Nanogratings in fused silica: Formation, Control, and Applications, Journal of Laser Applications, Vol.24, No.4, pp.042008, 7/2012