

フェムト秒レーザーダブルパルス列照射による高品質ガラス溶接

杉岡幸次、Sizhu Wu、Dong Wu、Jian Xu、緑川克美

緑川レーザー物理工学研究室

ガラス基板のマイクロ溶接は、光学素子、MEMS、オプトフレイディクスなどへの応用への期待から、近年注目を集めている。レーザー溶接は、自由度に富み、高速、高精度のプロセスを実現するため広く用いられている。しかし重ねたガラス基板を貼り合わせようとした場合、貼りあわせる2枚のガラス界面でのみレーザー光の吸収を生じさせる必要があり、一般的なレーザーは用いることはできない。一方フェムト秒レーザーは高強度であるために透明材料に対して多光子吸収を生じさせることができる。このときレーザー光を適当なパルスエネルギーに調整し、2枚のガラス界面で集光すれば、集光点でのみ多光子吸収を誘起でき、それによって重ねあわせた2枚のガラス界面を溶融し溶接を行なうことができる[1, 2]。

一般的にフェムト秒レーザー加工は非熱加工といわれているが、熱の発生が全くない訳ではなく、特にパルスの繰り返し周波数が数百 kHz を超えてくると熱の蓄積効果が顕著になり、効率的な溶接が行なえる。我々は、ガラス溶接において高品質化・高効率化を図るために、フェムト秒レーザーのダブルパルス列照射を提案した[3]。フェムト秒レーザーをガラス内部に照射した場合、まず多光子吸収によって伝導帯に自由電子が生成される。生成された自由電子は同じパルスの後半部分の光子をさらに吸収し、さらに高い準位に励起される（電子加熱）。あるいはレーザー強度が充分大きい場合はアバランシェイオン化により2次電子を生成する。最終的にはこれらの自由電子が価電子帯に緩和する際に熱を発生し、溶融により溶接が行なわれると考えられる（図1(a)）。このとき通常のシングルパルス列照射では、これらの連続する励起過程（多光子吸収+電子加熱、あるいはアバランシェイオン化）は同一のパルス内で生じる。もしそれぞれの過程を独立に制御して電子を励起できれば、より効率的な溶接が行なえるはずである。そこでダブルパルス列照射を用いれば図1(b)に示すように、多光子吸収を第1パルスで、電子加熱あるいはアバランシェイオン化（図ではアバランシェイオン化の場合をしめしてある）を第2パルスによって生じさせ、より多くの自由電子（電子加熱の場合はより高エネルギーの電子）を生成できる可能性がある。

実験では、パルス幅 360 fs、波長 1045 nm、繰り返し周波数 200 kHz のフェムト秒レーザーを用いて、感光性ガラスの溶接を行なった。図2に、接合強度の第1パルスと第2パルスの照射遅延時間依存性を評価した結果を示す。この場合、第1パルスには p 偏光、第2パルスには s 偏光の光を用い、双方ともパルスエネルギー 0.96 μJ で照射した。溶接を行なうために、レーザー光は開口数 0.40 の対物レンズで2枚の感光性ガラス界面に集光し、 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ の領域を 300 $\mu\text{m/s}$ の速度で走査した。接合強度は、遅延時間 0 ps の 10.52 Mpa から遅延時間の増加とともに急激に増加し、15 ps では 13.36MPa に達する(27%増加)。その後接合強度は 30 ps にかけて急激に減少するが、遅延時間 100 ps 付近にもう一つの小さいピークが観察され 40 ns にかけて緩やかに減少する。しかし接合強度は 40 ns においても、遅延時間 0 ps より大きい値を示している(シングルパルス列照射の場合も示してあるが、その接合強度よりも大きい)。

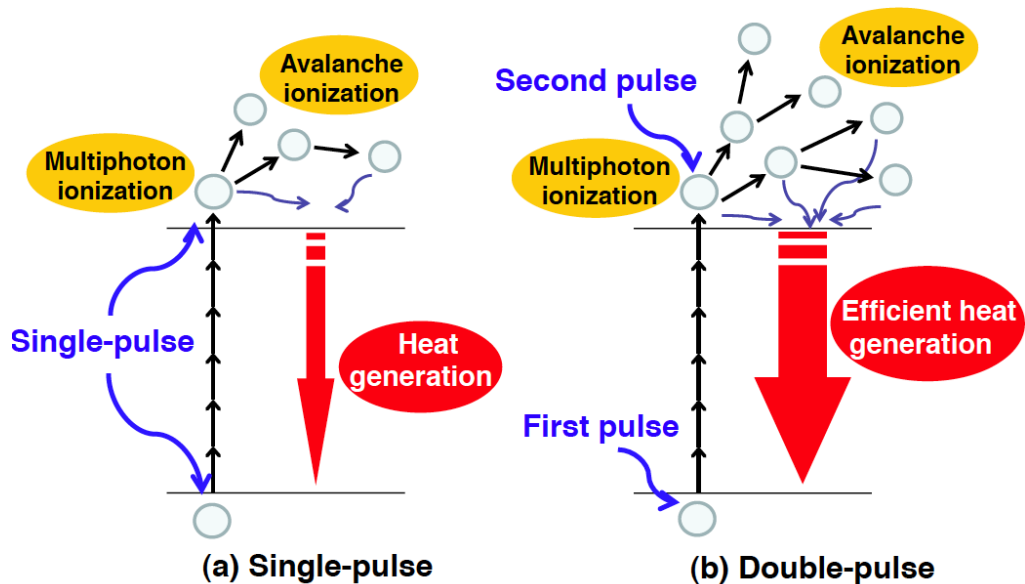


図1 ガラス中の電子励起過程。(a)シングルパルス、(b)ダブルパルス。

通常価電子帯から伝導帯に励起された自由電子の緩和時間は、材料に依存し数百 fs～数十 ps といわれている。この緩和時間内に第2パルスを照射すれば、第2パルスは第1パルスによって生成された自由電子に吸収され、電子加熱あるいはアバランシェイオン化を効率よく引き起こすことができる。感光性ガラスの緩和時間を 15 ps 程度と考えれば、遅延時間 15 ps で最大の接合強度が得られた要因を説明することができる。この場合 15 ps 以降では自由電子は緩和により消滅するため、もはや第2パルスは自由電子に吸収されることなく、接合強度は急激に減少する。一方緩和した電子の一部は緩和時間の長い(数十 ns 程度)局在準位(欠陥準位あるいはエキシトン)に捕捉され、第2パルスの局在準位による吸収が生じると仮定すると、接合強度が遅延時間 30 ps～40 ns の範囲でも 0 ps あるいはシングルパルス列照射の場合より大きくなる理由が説明される。

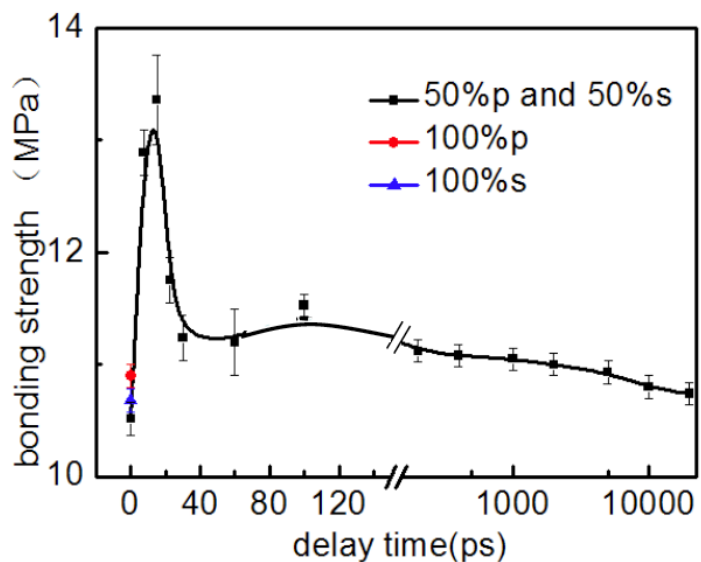


図2 接合強度の遅延時間依存性。

参考文献

- [1] T. Tamaki, W. Watanabe, J. Nishii, and K. Itoh, Jpn. J. Appl. Phys. **44**, L687 (2005).
- [2] I. Miyamoto, A. Horn, and J. Gottmann, J. Laser Micro/Nanoeng. **2**, 7 (2007).
- [3] K. Sugioka, M. Iida, H. Takai, and K. Midorikawa, Opt. Lett. **36**, 2734 (2011)

