

高繰り返しピコ秒パルスレーザーによる ガラスと半導体材料の溶融接合法

岡山大学 学術研究院自然科学学域
准教授 岡本 康寛

(2018年度 重点研究開発助成 課題研究 AF-2018204-A3)

キーワード：ピコ秒パルスレーザー，微細溶接，ガラス，半導体

1. 研究の目的と背景

カーボンニュートラルを目指して様々な取り組みが進む今日、消費者の嗜好や活躍する産業も多様化し、多種多様なデバイスが求められる。また、情報化社会であらゆるものから様々な情報を得ることでより効率的な活動を目指した開発が求められていることから、今後も非常に多くのセンシングが必要になると考えられる。そのセンシングには半導体センサが必要不可欠であり、それらを安定的に使用するためにガラス等で封止する必要がある。したがって、空間自由度が高く、高信頼性が得られる単結晶シリコンとガラスの接合法が求められてくる。加えて、インターポーザ材料としてガラス基板が用いられることが期待されており、ガラスと各種半導体材料の接合技術が重要になると考えられる。一般に、シリコンとガラスの接合には陽極接合が多用されており、約400度に加熱してガラス側に500V程度の負電圧を印加することで一括接合できる¹⁻³⁾。しかし、高温下で高電圧を印加することから内部の電子回路へ悪影響を及ぼす危険性があり、接合に必要な時間も一般的に長い。

一方、10ピコ秒程度のレーザー光パルスを用いて微細スポットに集光すると、その瞬間的なパワー密度が大きくなることから、透明体材料であっても一部のレーザー光は非線形吸収現象によりガラスへ直接的にエネルギー吸収される^{4, 5)}。この吸収レーザー光エネルギーを熱源としてガラス材料を溶融させることで半導体材料とガラス基板を接合する。すなわち、10ピコ秒程度のパルスレーザーによる瞬間的な熱源を用いることで、ガラス同士の接合同様に脆性材料である半導体材料とガラス基板を高品位に接合できる可能性がある。さらに、半導体基板での線形吸収とガラス内部での非線形吸収の混在する本手法は、作動距離の大きな集光レンズと高繰り返しレーザーを用いることで高いプロセス速度と自由度が期待できる。これにより、陽極接合に劣らないプロセス速度を達成し、空間選択的な接合となることから電子回路に及ぼす影響も低減できる。

そこで本研究では、従来の陽極接合に代わる新たな接合法としてピコ秒レーザーを用いた半導体材料、主として単結晶シリコンとガラス基板の直接接合法の開発を行った。はじめに、レーザー光波長やパルス幅は材料内部への光の進入深さや溶融状態に大きく影響することから、その特性を議論した。そして本手法を適応するためには、接合部の機械

強度を評価することも重要であることから、直接的な接合強度の評価を行い、レーザー光照射条件と機械強度の関係を明らかにし、ピコ秒レーザーを用いた半導体材料とガラス基板の直接接合技術に必要な技術の確立を目指すとともに、空間位相変調器を用いた次世代の接合手法に必要な基礎要素に関する検討を行った。

2. 実験方法

レーザー光源として、波長532nmおよび波長1064nmのナノ秒パルスレーザーとピコ秒パルスレーザーの合計4種類を用いた。それらのレーザー光を図1に示すように、ガラスと単結晶シリコンの境界面へガラス基板側より照射した。いずれのレーザー光においても集光スポット直径は約20 μ mである。単結晶シリコンとガラスの境界面は、オプティカルコンタクトが得られるように重ね合わせた。しかし、その大きすぎるオプティカルコンタクト領域はせん断強度の評価に大きく影響を及ぼすことが明らかとなっている⁴⁾。そこで、接合領域を特定できるようにするためにシリコン製のマスクを作製した上より、未処理面へ汚染やダメージを及ぼさない反応性イオンエッチング(C₂F₆, 6.7Pa, 20sccm)により、幅1mm、長さ20mmのオプティカルコンタクト領域を作製した。この領域にレーザー光照射条件を変化させて溶接ビードを形成した。そして、Arイオンビームにより溶接ビード断面を研磨し、走査型電子顕微鏡により観察して溶接ビードの状態を評価した。試料には厚さ0.675mm、比抵抗10⁻² $\Omega \cdot \text{cm}$ 、(100)面のP型単結晶シリコン、厚さ1.0mmの陽極接合用ガラス(SW-Y, Asahi Glass Company)、および厚さ1.1mmのホウ珪酸ガラス(D263, Schott)を用いた。せん断試験には単結晶シリコンの線膨張係数に合わせて調整された陽極接合用ガラスSW-Yを、溶接ビード断面の観察を行う場合は主にホウ珪酸ガラスD263を使用した。

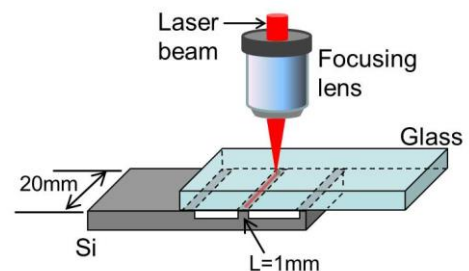


図1 幅1mmのGlass/Siへのレーザー光照射の模式図

脆性材料の微細接合部の機械強度を議論する場合、一般的な評価手法ではねじり等が作用して測定値にバラツキが多くなることから適切に評価することは容易でない。そこで溶接ビード形成後の試料は、図2に示すように、試験中のねじれを抑制するためリニアガイドを利用したクランプジグを用いてせん断試験を行った。なお、リニアガイドの摩擦力は最大破断荷重と比較して十分に小さいことを確認している。また、せん断試験前に溶接ビードの面積を測定し、破断荷重を溶接ビードの面積で除すことでせん断強度を求めた。せん断試験用の試料には1mm×20mmのオプティカルコンタクト領域に5本の溶接ビードを形成し、同一条件で5回測定を行ってその平均値をせん断強度として評価した。

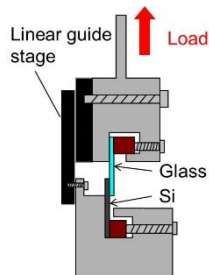


図2 せん断試験方法模式図

3. レーザ光波長とパルス幅が溶融痕形成と接合強度に及ぼす影響

レーザー光波長として、532nmと1064nmの2種類、各々の波長に対してナノ秒パルスとピコ秒パルスの2種類、計4種類のパルスレーザーを用い、単結晶シリコンとガラスの組み合わせに対して適切なレーザー光波長とパルス幅を検討した。図1で示したガラスと単結晶シリコンの組み合わせ試料に対して、レーザー光パルスが重ならないようにガラス基板からレーザー光を照射し、破断強度を測定した結果を図3に示す。波長532nmよりも1064nm、ナノ秒よりも

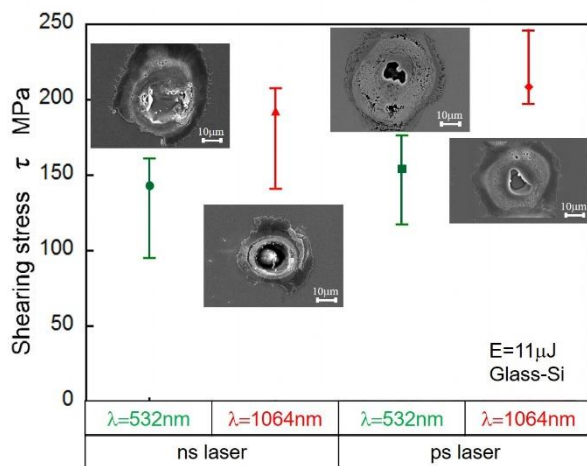
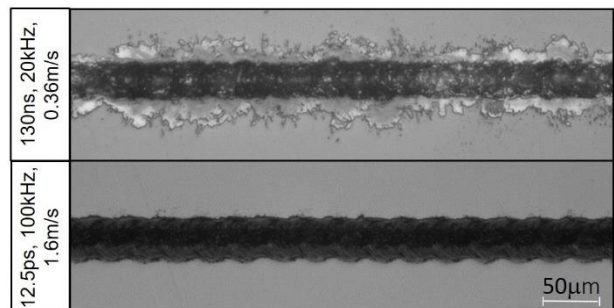


図3 レーザ光波長とパルス幅が Glass/Si 接合の破断強度に及ぼす影響

ピコ秒パルスレーザーの方が溶融物の飛散が少なく、穏やかな溶融痕形成が可能であった。そして、接合部の破断強度は、波長532nmよりも1064nmの方が、パルス幅はナノ秒よりもピコ秒の方が大きな値となっている。

一般に、シリコンは可視域である波長532nmよりも近赤外に属する波長1064nmの方が吸光度は低く、シリコン表面におけるエネルギー吸収が穏やかになる。また、レーザー光の重なり量を示すオーバーラップ率が90%と非常に大きな条件であっても、図4に示すようにピコ秒パルスの方がレーザー光走査線周囲への溶融物の飛散が少なく、非常に穏やかな溶接ビードが形成できている。溶融物の飛散はガラスと単結晶シリコンの界面へ生ずることから、両試料を離す方向へ作用するので良好な接合を考えると避けるべきである。したがって、ガラスと単結晶シリコンで大きな接合強度を得るためには、近赤外線とピコ秒パルスレーザーの組合せが有効であることがわかる。



λ=1064nm, E=11μJ, Overlap rate=90%

図4 高パルス繰り返し数におけるパルス幅の効果

4. 近赤外ピコ秒パルスレーザーによる溶接特性

波長1064nm、パルスエネルギー3μJ、パルス幅20psのピコ秒パルスレーザーを用いてガラスと単結晶シリコンの接合を行った。このとき、レーザー光走査速度2m/s一定でパルス繰り返し数が接合部に及ぼす影響をガラス基板上部側から観察した結果を図5に示す。ここでは図上部から下部へレーザー光が走査している。低いパルス繰り返し数である0.25MHzでは、溶融材料が周囲へ飛散していることが確認されるが、パルス繰り返し数が1.0MHz以上と大きくなると溶融飛散物はほとんど確認できなくなる。また、パルス繰り返し数が1.0MHzから大きくなるにつれて入熱量が増えて熱蓄積量が増大することから溶接ビードの幅も広がっている。このように、ガラスや単結晶シリコンの溶融領域へレーザー光が繰り返し照射されることで大きな割れを生じることなくプロセスが進行していると考えられる。しかし、図4で示したパルス幅が短い12.5psでは0.1MHzで溶融物の飛散はほとんど確認できないが、それよりも長い20psでは大きなパルス繰り返し数0.25MHzにおいても溶融物の飛散が確認されたことから、適切なパルス幅とパルス繰り返し数の関係性は更なる議論が必要である。ところで、図中の写真右側に示す数値は

同一箇所へのレーザパルス照射数 N であり、式(1)により求めた。

$$N = \frac{d \cdot R_p}{v} \quad (1)$$

ここで d , R_p , v は各々スポット直径, パルス繰り返し数, およびレーザ光走査速度である。大きなレーザパルス照射数は溶融領域を拡大するように徐々にレーザ光が照射されていること, 小さなレーザパルス照射数は勢いよく溶融領域へレーザ光が進展していることを表している。したがって, パルス繰り返し数の小さな条件である 0.25MHz では溶融飛散物が顕著に確認されたものと考えられ, パルス繰り返し数やレーザパルス照射数が溶接ビードの形成状態に大きく影響すると考えられる。

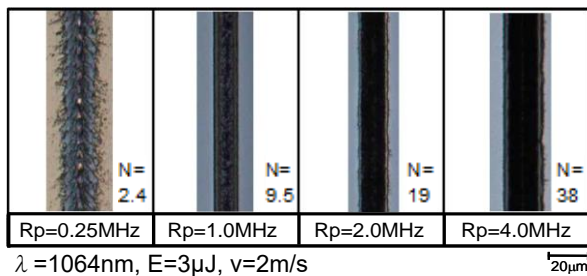
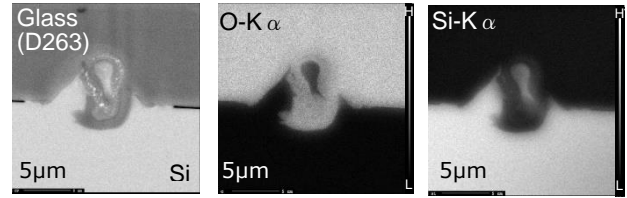


図5 パルス繰り返し数が接合状態に及ぼす影響

図6はパルスエネルギー $2\mu\text{J}$, パルス繰り返し数 2.0MHz, レーザ光走査速度 2m/s で照射したときの溶接ビード断面の組成像, および O と Si 元素分布を示したものである。観察, 測定は波長分散型 X 線分光法を備えた電界放射型走査電子顕微鏡を用いた。用いたガラス試料は単結晶シリコンの線膨張特性と異なるホウ珪酸ガラス D263 であるが, 高繰り返しピコ秒パルスレーザを用いて, 単結晶シリコンとガラスのクラックフリー微細溶接が行えている。また, 単結晶シリコンとホウ珪酸ガラス D263 の境界面は平らではなく複雑に入り組んだ形状となっており, レーザ光照射によるへこみとその周囲に隆起した領域が存在している。このガラスの塑性変形より, レーザ光照射領域のガラスは少なくとも軟化点(1,324K)以上に温度上昇したと考えられる。また, 組成像からのみならず, O および Si 元素分布からも, ガラス側へシリコンが拡散していることが確認されるとともに, 細片化された塊として存在していることがわかる。このガラス側へのシリコンの拡散や細片化された塊の残存から, レーザ光照射部近傍における照射光軸上のガラス材料はレーザ光のエネルギーを直接吸収し, 温度上昇が生じているものと考えられる。すなわち, 高繰り返しレーザによる熱的作用により励起された電子がアバランシェ電離をとまなうこと, および既に拡散したシリコンによってガラスにおいてもレーザ光エネルギーの一部が吸収され, ガラス側へのシリコンの拡散や細片化された塊の残存が生じたものと考えられる。また, 非常に薄いシリコンの層が隆起領域の外周部にあるガラ

スとシリコンの境界領域に観察される。これは単結晶シリコンが融点以上の温度まで上昇するとともに, レーザ光照射領域の一部は蒸発をとまなうような温度まで上昇し, それによって生ずる反跳圧力によって材料が周囲へ流動したと考えられる。



$\lambda = 1064\text{nm}$, $t_p = 20\text{ps}$, $R_p = 2\text{MHz}$, $E = 2\mu\text{J}$, $v = 2\text{m/s}$

図6 近赤外高繰り返しピコ秒パルスレーザによる Glass/Si 接合部断面

図7は単結晶シリコンと陽極接合用ガラス SW-Y をパルスエネルギー $3\mu\text{J}$ 一定で照射して作製した試料のせん断強度とレーザパルス照射数の関係を示したものである。ここでは, パルス繰り返し数およびレーザ光走査速度を変化させており, それらの条件よりレーザパルス照射数を求めて整理した。せん断試験時のクロスヘッドを移動させる試験速度は 0.5mm/min 一定とした。図に示すように, レーザパルス照射数 10 以下ではせん断強度は 50MPa 程度以下となっているが, それ以降ではレーザパルス照射数の増大ともなってせん断強度も大きくなっている。そして, レーザパルス照射数 20 程度でせん断強度は最大値をとり, その後は低下する。これらの結果から判断すると, 強固な接合継ぎ手を得るためには, ある程度のレーザパルス照射数が必要であり, 高繰り返しピコ秒パルスレーザで適切なレーザパルス照射数を用いることで 85MPa 程度と陽極接合に匹敵する高いせん断強度が得られた。パルス繰り返し数に着目するとパルス繰り返し数 1.0MHz は他のパルス繰り返し数と比較して高いせん断強度が得られており, 適切なレーザパルス照射数と入熱量により良好な接合継ぎ手が形成されたと考えられる。一方, パルス繰り返し数

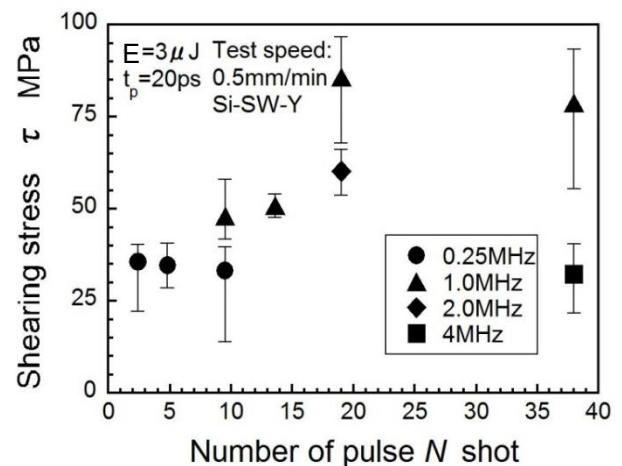


図7 せん断強度とレーザパルス照射数

4.0MHz とパルス繰り返し数が大きくなるとせん断強度は低下していた。大きすぎるパルス繰り返し数は熱蓄積による熱的作用の増大につながることから、大きなパルス繰り返し数で強固な接合状態を実現するためには、適切なレーザーパルス照射数を得るために大きなレーザー光走査速度が必要になると考えられる。

走査電子顕微鏡により破断面を観察した結果を図8に示す。ここで、パルス繰り返し数 0.25MHz と 2.0MHz におけるレーザーパルス照射数 N はそれぞれ 4.5 と 19 である。せん断強度の低かったパルス繰り返し数が小さい 0.25MHz では破断はシリコンとガラスの境界面で生じており、破断面も比較的フラットである。一方、高いせん断強度が得られた高パルス繰り返し数の 2.0MHz では、接合部が未溶融領域も含めて剥がれている。これは、先に示した接合部の形状によるアンカー効果によって強固な接合状態が得られたと考えられる。すなわち、強固な接合継ぎ手を得るためにはシリコンとガラスが絡み合った状態が有効であり、レーザーパルス照射数やパルス繰り返し数がせん断強度に大きく影響を及ぼすと考えられる。

本実験において高いせん断強度が得られたレーザーパルス照射数 N は 20 程度であった。これは、パルス繰り返し数 1.0MHz ではスポット直径 $20\mu\text{m}$ 、レーザー光走査速度 1.0m/s で得られる値であり、同等のスポット直径ではパルス繰り返し数 4.0MHz においてレーザー光走査速度 4.0m/s まで増大したときに同等のレーザーパルス照射数 20 が得られる。これは 8 インチの単結晶シリコンウェハ全域を 7 分程度で処理できる速度であり、陽極接合法に匹敵するプロセス速度が期待できる。また、本レーザープロセスは事前、事後加熱等が必要なく、空間選択的な接合が容易である。開発が進むピコ秒パルスレーザーのパルス繰り返し数の更なる向上とレーザー光走査速度の高速化が組み合えば、本手法は高効率、高機能な単結晶シリコンとガラスの微細接合法として高い可能性を有することが期待できる。

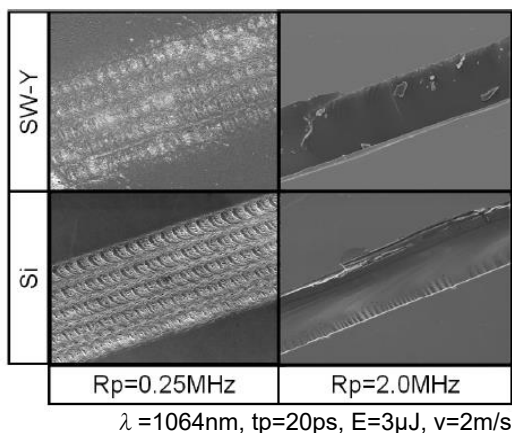


図8 せん断試験後の破断面

5. 空間光位相変調器を用いたガラス内部の溶融領域制御の可能性

ガラス内部で更なるレーザー光のエネルギー吸収が実現できれば、本手法はより有用になると考えられる。そこで、空間光位相変調器を用いてガラス内部におけるエネルギー吸収点の制御を試みた。ここでは光軸方向に2点集光するように空間光位相変調器を制御してガラス内部に集光することで2つの溶融領域形成を目指した。図9にレーザー光走査方向に配置した光軸方向で異なる焦点位置となる2つの集光点をレーザー光走査方向に配置する計算機合成ホログラム CGH(Computer Generated Hologram)作成過程の概要を示す。白点を1つプロットしたパターン画像を CGH に変換してフレネルレンズホログラムを足し合わせたものを複素振幅合成した。なお、集光点の位置を調節する際は、上下の集光点の干渉を抑制するために、下側の集光点をレーザー光の走査方向に対して先行するように配置し、上側の集光点が後ろから追いかけるように配置した。このように作成した CGH を用いて空間光位相変調器を動作させることで、レーザー光軸方向の2点集光を試みた。

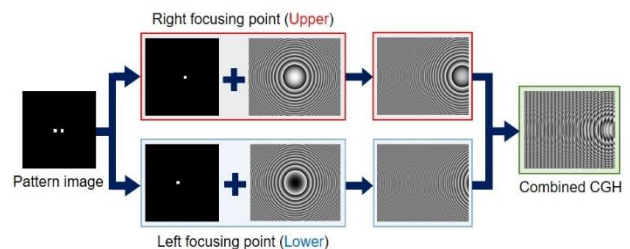


図9 光軸方向2点集光のCGH作成の概要

空間光位相変調器 SLM (Spatial Light Modulator) を用いたレーザー光照射実験装置を図10に模式的に示す。レーザー発振器から出力されたレーザー光を SLM に反射させ、入力した CGH によって光位相の空間分布を制御し、リレーレンズを介して対物レンズに入射してガラス試料内部に照射した。

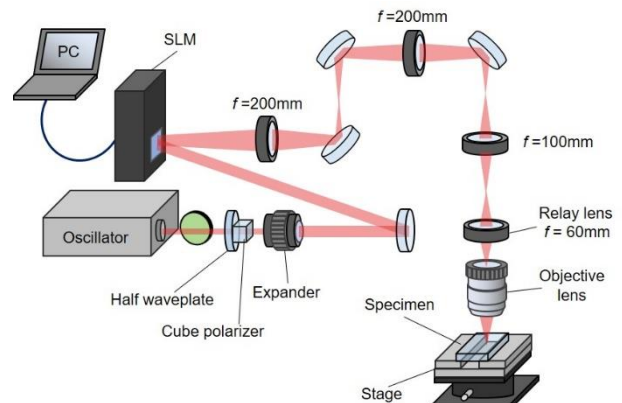


図10 空間光位相変調器を用いた実験装置模式図

図 11 にフレネルレンズホログラム作成時の上側焦点距離 f_{upper} と下側焦点距離 f_{lower} を変化させたときのビットマップ (BMP) 像と CGH 像を、そしてそれを用いて形成された溶融領域の断面写真示す。レーザ光波長 1064nm のピコ秒パルスレーザをパルスエネルギー 4.5 μ J、パルス繰り返し数 1.0MHz、走査速度 60mm/s でホウ珪酸ガラス D263 の内部へ集光し、フレネルレンズホログラムの焦点距離のみを変化させた。レーザ光は図上部から照射されており、紙面に垂直方向へ走査している。溶融痕は 1 度のレーザ光走査で光軸方向に 2 つ形成され、光軸方向に多点集光できることが確認できた。フレネルレンズホログラムの各焦点距離における溶融痕間距離は、レンズの公式を用いて推定した集光点とフレネルレンズホログラムの焦点距離の関係と一致しており、ガラス内部であってもしっかりと集光性特性を維持できるものと考えられる。一方、形成される 2 つの溶融領域は、フレネルレンズホログラムの焦点距離が大きくなるにつれて接近、結合した。1 つの溶融領域では縦に長く、溶融領域の上下に大きな応力集中が懸念させるが、2 つの溶融領域が結合すると丸みのある溶融領域が形成されており、局所的な応力集中低下が期待できるものであった。以上のように、空間光位相変調器を用いてガラス内部における溶融領域形成制御の可能性を明らかにすることができた。今後は本手法をさらに発展させ、半導体材料とガラスの溶融溶接法の高度化を目指していきたいと考えている。

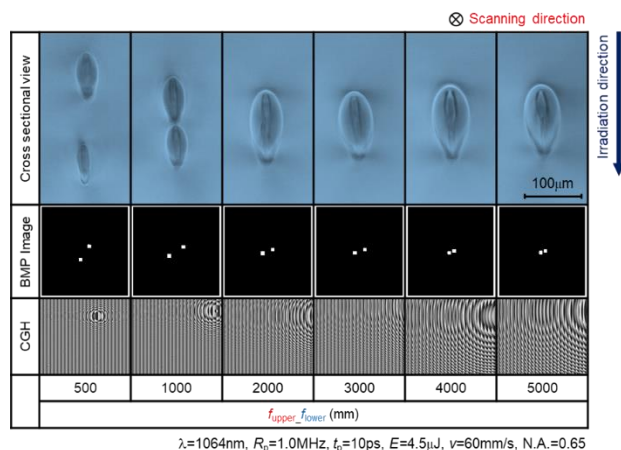


図 11 光軸方向 2 点集光によるガラスの溶融領域形成

6. 結 言

本研究では単結晶シリコンとガラス基板の直接接合法の開発を目指して、レーザ光源として、波長 532nm および波長 1064nm のナノ秒パルスレーザとピコ秒パルスレーザの合計 4 種類を用い、レーザ光波長とパルス幅の影響を議論するとともに、溶接継手の機械強度を評価した。さらに、空間位相変調器を用いた次世代の接合手法に必要な基礎要素についても検討を行った。本研究で得られた主な結言は以下のとおりである。

- (1) 近赤外波長のナノ秒パルスレーザよりもピコ秒パルスレーザを用いた方が溶融物の飛散を抑制できる。
- (2) 波長 532nm よりも波長 1064nm の方が、ナノ秒パルスレーザよりもピコ秒パルスレーザの方がせん断強度は大きくなることから、近赤外ピコ秒パルスレーザが本手法に有用である。
- (3) 近赤外ピコ秒パルスレーザを用いたとき、大きなせん断強度を得るためには適切なレーザパルス照射数があり、本実験条件ではレーザパルス照射数 20 程度で最大のせん断強度を示す。
- (4) 近赤外ピコ秒パルスレーザを用いたとき、パルス繰り返し数が 0.25MHz と小さいと周囲への溶融物飛散が多くなるとともに、ガラスと単結晶シリコンの界面での破断となり、せん断強度が小さい。一方、パルス繰り返し数 2.0MHz と大きな方ではアンカー効果が期待できるような接合部が形成されることで、単結晶シリコンの母材側で破断して高いせん断強度が得られる。
- (5) 複数のフレネルレンズホログラムを複素振幅合成した CGH を空間光位相変調器に用いることでレーザ光の集光点を光軸方向に分割することができる。そして、フレネルレンズホログラムの焦点距離を変化させることで集光点位置を光軸方向に制御し、ピコ秒パルスレーザ照射時にガラス内部における溶融領域形状を変化させることができる。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の重点研究開発助成課題研究 (AF-2018204-A3) を受けて行われたものであり、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) G. Wallis, D. I. Pomerantz: Field Assisted Glass- Metal Sealing, J. of Applied Physics, 40, 10, (1969) pp.3946-3949.
- 2) M. Esashi: Encapsulated Micro Mechanical Sensors, Microsystem Technologies, 1, (1994) pp. 2-9.
- 3) B. Ziaie, et al.: A hermetic Glass-Silicon Micropackage with High-density on-chip Feedthroughs for Sensors and Actuators, J. of Microelectromechanical Systems, 5, (1996) pp.166-179.
- 4) Y. Okamoto, et al.: Evaluation of Molten Zone in Micro-welding of Glass by Picosecond Pulsed Laser, J. of Laser Micro/Nanoengineering, 8, 1, (2013) pp.65-69.
- 5) I. H. W. Nordin, et al.: Effect of Focusing Condition on Molten Area Characteristics in Micro-welding of Borosilicate Glass by Picosecond Pulsed Laser, Applied Physics A, Materials Science & Processing, Vol.122, No.5, (2016) pp.492:1-11.