

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 1 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760107

研究課題名(和文)超短パルスレーザーによる半導体材料とガラスの直接接合技術

研究課題名(英文)Direct bonding of semiconductor material and glass by ultra-short pulsed laser

研究代表者

岡本 康寛 (OKAMOTO, YASUHIRO)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：40304331

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：ピコ秒パルスレーザーによるガラスとシリコンの空間自由度の高い接合法を検討した。ガラス側からガラスとシリコンの境界面へレーザー光を照射すると、レーザー光は主にシリコンに吸収されるが、その一部はガラス側で吸収されることも示唆された。そして温度上昇で生じた圧力により、ガラスとシリコンがその境界面で流動することで強固な接合継手を形成でき、適切な時間間隔で適切なパルス数を照射することで、高いせん断強度が得られた。

研究成果の概要(英文)：Locally selective welding method of monocrystalline silicon and glass was experimentally investigated. Laser beam was mainly absorbed at monocrystalline silicon through glass plate. It was considered that the absorption of laser energy to glass was occurred, and the convection of silicon and glass was caused by the pressure of high temperature. Strong weld joints could be created by mixture of silicon and glass at the interface, and higher shearing strength of weld joint could be performed at proper number of laser shot in the laser spot.

研究分野：特殊加工

キーワード：超短パルスレーザー シリコン ガラス 微細溶接 機械強度 接合 せん断強度 半導体材料

1. 研究開始当初の背景

MEMS の各種センサはインクジェットプリンタのヘッド、圧力センサ、加速度センサなど多岐にわたって我々の生活に必要な不可欠な存在になっている。MEMS は半導体基板、特にシリコン基板に対して各種微細加工技術を用いて製作される。これらを多様な環境下で適切に動作させるために、一般的に単結晶シリコン基板に形成された電子回路はガラス基板により封止されている。従来、単結晶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、一括処理できることから高いスループットが期待できる。しかし、数百にて数百ボルトの電圧印加にて必要時間保持するその手法は、アルカリイオンの移動により単結晶シリコンに形成された電子回路へ影響を及ぼし、その能力を低下させることが懸念される。また、空間選択的な接合を実現するためには事前に回路等を形成する必要があり、空間自由度は一般的に高くはない。一方、レーザによる溶融接合法は接着剤を用いず、要求される接合領域のみを選択的に接合でき、ナノ秒パルスレーザによる取り組みが報告されている。また、近年では超短パルスレーザによる非線形吸収を活用した透明体材料の接合法が検討され、接合部の機械強度も評価が進んでいる。さらにフェムト秒パルスレーザを高い開口数のレンズによる集光することで得られるフィラメント効果を利用してガラスとシリコンの接合が可能であることを報告している。しかし、その特性はまだ不明な点が多く、機械的強度も陽極接合法と比較して十分に得られているとは言えない。そのため、レーザを用いた空間的自由度ならびに機械的強度に優れる接合法が確立できればこの分野に大きく貢献することが期待できる。

2. 研究の目的

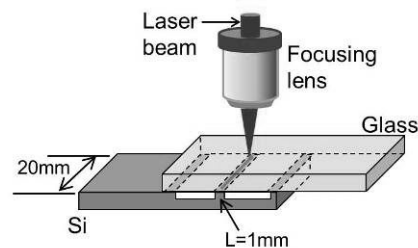
近年、超短パルスレーザの開発が活発化しており、高繰り返しにおいても材料加工に必要なパルスエネルギーが得られている。特にピコ秒パルスレーザは高繰り返しで安定性に優れる。この高繰り返しピコ秒パルスレーザを用いた空間選択的なガラスと単結晶シリコンの微細溶接が実現できれば、プロセス速度においても陽極接合と比較しうる手法になるものと考えられる。そこで本研究では、高繰り返しピコ秒パルスレーザを用いた半導体材料の代表格である単結晶シリコンとガラス基板の直接接合を試みる。本手法を適応するためには、接合部の機械強度を評価することも重要であることから、直接的な接合強度の評価、ならびに環境試験を行って、レーザ照射条件と機械強度の関係を明らかにし、ピコ秒パルスレーザを用いた半導体材料とガラス基板の直接接合に必要な基板技術の確立をめざして検討を行った。

3. 研究の方法

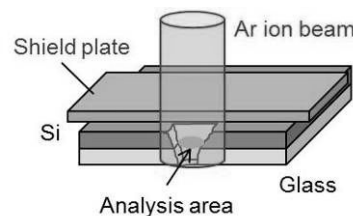
本研究ではピコ秒パルスレーザをとって波長 1064nm、パルス幅 12.5ps と 20ps のレーザ光を、ナノ秒パルスレーザとして波長 1064nm、パルス幅 130ns を用いて図 1 (a) に示す様に、ガラスと単結晶シリコンの境界面へガラス基板側から照射した。NA0.1 の集光レンズを用いており、この時の集光スポット直径は $19\mu\text{m}$ である。単結晶シリコンとガラスの境界面はオプティカルコンタクトが得られるように適切なクリーニングを行った後に重ね合わせた。しかしながら、大きすぎるオプティカルコンタクト領域はせん断強度の評価に大きく影響を及ぼすことが明らかとなっている。そこで、未処理面へ汚染やダメージを及ぼすことなく処理が可能な反応性イオンエッチング (C_2F_6 of 6.7Pa and 20sccm) を用いて、幅 1mm、長さ 20mm のオプティカルコンタクト領域を作製した。この領域にレーザ照射条件を変化させて溶接ビードを形成し、図 1 (b) に示す様に Ar イオンビームにより溶接ビード断面を研磨した。これを走査型電子顕微鏡により観察して、溶接ビードの状態を検討した。

試料には厚さ 0.675mm、比抵抗 $10^{-2}\Omega\text{cm}$ 、(100)面の P 型単結晶シリコン、厚さ 1mm の陽極接合用ガラス (SW-Y, Asahi Glass Company)、およびホウ珪酸ガラス (D263, Schott) を用いた。せん断試験には主に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 を用いた。一方、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。

溶接ビード形成後の試料は、図 2 に示す様に試験中における試料のねじれを抑制するためニアガイドを設けた保持具を用いて



(a) レーザ光照射実験の模式図



(b) 断面観察方法の模式図

図 1 試料セットアップの模式図

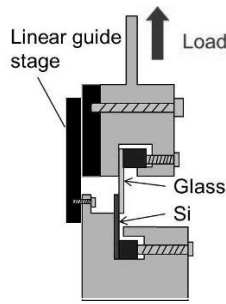


図2 せん断試験の模式図

せん断試験を行った。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してせん断強度を求めた。なお、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た。そして、同一条件で5回測定を行い、その平均値をせん断強度として評価した。

4. 研究成果

(1) パルスレーザによる微細溶接特性

パルス幅が溶接ビード形成に及ぼす影響

パルスエネルギーを11μJ、オーバーラップ率を90%と統一してパルス幅130nsと12.5psのレーザ光を単結晶シリコンとホウ珪酸ガラス D263 の界面へ照射した結果を図3に示す。これらの写真はガラス基板上部から単結晶シリコン基板側を観察したものであり、図左から右側へレーザ光が走査されている。図に示す様にナノ秒パルスレーザでは溶接ビードの周囲へ多くの溶融物が噴出しているのが確認される。一方、ピコ秒パルスレーザでは溶接ビード周囲への溶融物飛散はほとんど無く、レーザ光照射領域近傍のみで溶接ビードを形成できていることがわかる。すなわち、ピコ秒オーダーのパルス幅を用いることで、安定した溶接プロセスを実現できる可能性を有していることがわかる。

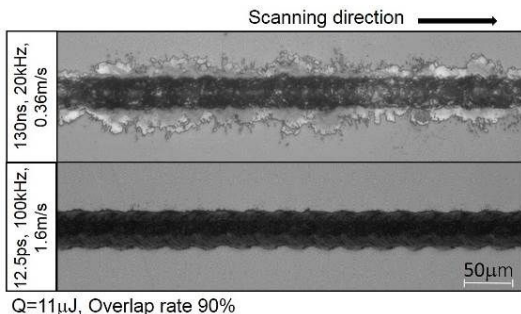


図3 パルス幅が溶接ビードの及ぼす影響

ピコ秒パルスレーザによる微細溶接特性

パルスエネルギー4μJのピコ秒パルスレーザを、単結晶シリコンとホウ珪酸ガラス D263

の境界面へレーザ光走査速度 2m/s 一定でパルス繰り返し数を変化させて照射した結果を図4に示す。これらの写真はガラス基板上部から単結晶シリコン基板側を観察したものであり、図上部から下部へレーザ光が走査されている。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平均入熱量も増大することから、熱蓄積量が増大することで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に大きな割れを生じることなく溶融を生じさせ、その溶融状態の領域へレーザ光が繰り返し照射されていると考えられる。

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。

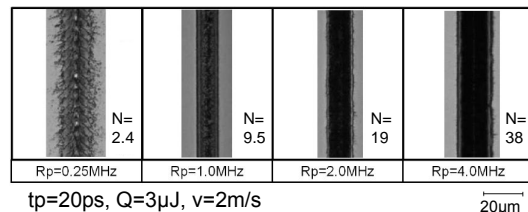
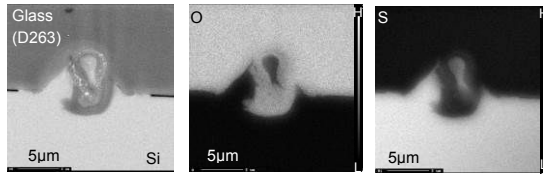


図4 パルス繰り返し数が溶接ビードの状態に及ぼす影響

図5はパルスエネルギー2μJ、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元素のマッピング結果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こと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、レーザー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、レーザー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。



tp=20ps, Rp=2MHz, Q=2μJ, v=2m/s

(a) 組成像 (b) O-Kα 像 (c) Si-Kα 像

図5 境界領域の組成像と成分分析結果

また、組成像からのみならず、0およびSi元素のマッピング結果からも、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、レーザー照射部近傍における照射光軸上のガラス材料はレーザー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、高繰り返しレーザー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もなうこと、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ー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、レーザー照射領域の一部は蒸発をとも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。

図6に高繰り返しピコ秒パルスレーザーを用いた単結晶シリコンとガラスの微細溶接の現象を模式的に示す。照射されたレーザー光は単結晶シリコン表面で吸収され、シリコンを溶融させる。加えて、レーザー光軸上のガラス材料もレーザー光エネルギーの一部を吸収することで軟化点(1,324K)以上まで温度上昇する。そしてレーザー照射領域の材料蒸発にともなう反跳圧力が溶融シリコンへ作用し、周囲の固体状態のシリコン領域によって半径方向への溶融シリコンの移動が拘束されてガラス側へシリコンが流動することで、観察されるようなシリコンのへこみと隆起が形成される。また、溶融シリコンの一部は高温状態のガラス内部へ飛散、拡散する。このようにレーザー照射部近傍の現象はダイナミックであるが、高繰り返しの条件を用い

ることで溶融物の飛散がほとんど観察されない穏やかな接合状態が得られていた。さらにこの接合部の形状からアンカー効果が生ずることが考えられ、高い接合強度が得られることが期待される。

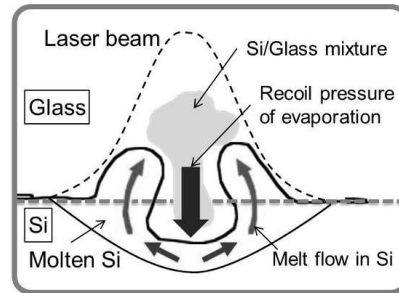


図6 シリコンとガラス界面における溶接形態の模式図

(2) 接合部の機械強度評価

パルス幅が接合継手の機械強度に及ぼす影響

まず、パルス幅の効果を確認するためにナノ秒パルスレーザーとピコ秒パルスレーザーをオーバーラップ率0、同一箇所へのレーザーパルス照射数1により作製した接合継手の機械強度を評価した。試料には単結晶シリコンとホウ珪酸ガラス D263 を用いた。図7に示す様に、ナノ秒パルスレーザーに比較してピコ秒パルスレーザーの方が大きな値を示している。これはナノ秒パルスレーザーでは図3で示したように、溶融材料が溶接ビード周囲へ飛散することから単結晶シリコンとガラスの界面に大きなギャップが生じたためと考えられる。すなわち、ピコ秒パルスレーザーの方が図5でも示した様にギャップへの材料流動が少なく、また、図7で確認できるように均一な界面が形成されていることから高い強度が得られたものと考えられる。これは同一箇所へのレーザーパルス照射数が多くなるほど顕著になるものと考えられ、ピコ秒パルスレーザーにより高い機械強度が得られることが期待できる。

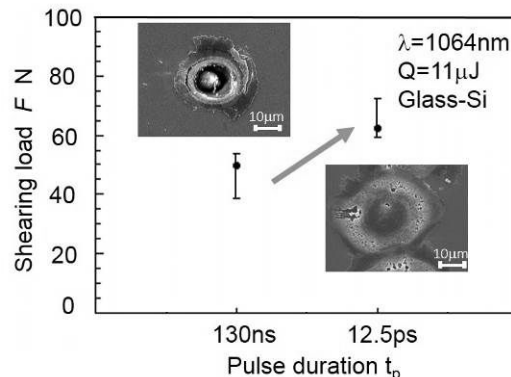


図7 パルス幅が破断力へ及ぼす影響

ピコ秒パルスレーザにより作製した接合継手の強度評価

図8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照射実験を行っており、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。せん断試験の試験速度は $0.5\text{mm}/\text{min}$ 一定とした。レーザパルス照射数が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にともなって、せん断強度も上昇している。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示し、その後は低下傾向にある。強固な接合継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 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手が形成されたと考えられる。一方、 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ダメージ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、適切なレーザパルス照射数を得るために大きなレーザ光走査速度が必要になると考えられる。

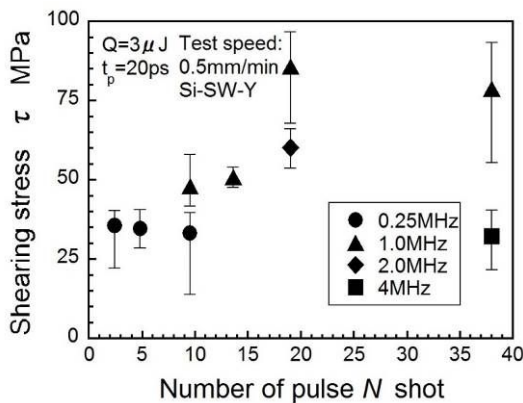


図8 同一箇所への照射パルス数とシリコンとガラス(SW-Y)のせん断強度

走査電子顕微鏡により破断面を観察した結果を図9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おり、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。

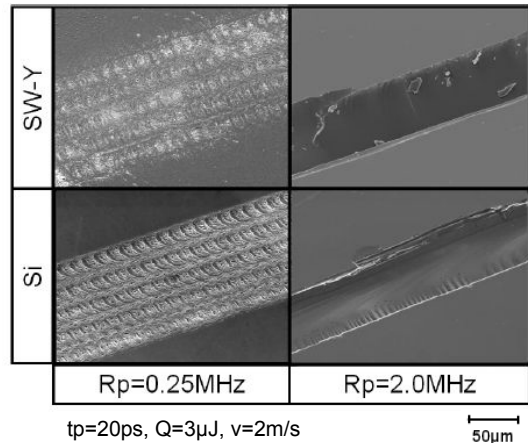


図9 破断面の走査電子顕微鏡写真

以上のように、ピコ秒パルスレーザをガラスとシリコンの境界面へ照射すると、その境界面でガラスとシリコンが流動することで強固な接合継手を形成でき、適切な時間間隔で適切なパルス数を照射することで、高いせん断強度が得られた。本実験において高いせん断強度が得られたレーザパルス照射数 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 $19\mu\text{m}$ 、レーザ光走査速度 $1.0\text{m}/\text{s}$ 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 においてレーザ光走査速度 $4.0\text{m}/\text{s}$ まで増大したときに同等のレーザパルス照射数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のパルス繰り返し数の更なる向上とレーザ光走査速度の高速化をあわせて考えると、ピコ秒パルスレーザを用いた本手法は高効率、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。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

Yasuhiro Okamoto, Isamu Miyamoto, Kristian Cvecek, Akira Okada, Kenta Takahashi, Michael Schmidt, Evaluation of Molten Zone in Micro-welding of Glass by Picosecond Pulsed Laser, Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 査読有, Vol.8, No.1, 2013, pp.65-69.

岡本康寛, 岡田 晃, 宮本 勇, ピコ秒レーザーによるシリコンとガラスの微細溶接法の試み, レーザー学会第454回研究会報告, 査読無, 2013, pp.11-16.

Yasuhiro Okamoto, Isamu Miyamoto, Jorma Vihinen, Akira Okada, Novel Micro-welding of Silicon and Glass by Ultrashort Pulsed Laser, Materials Science Forum, 査読有, Vol.783-786, 2014, pp.2792-2797.

Isamu Miyamoto, Yasuhiro Okamoto, Assi Hansen, Joma Vihinen, Tiina Amberla and Jarno Kangastupa, High Speed, High Strength Microwelding of Si/Glass using ps-Laser Pulses, Optics Express, 査読有, Vol.23, No.3, 2015, pp.3427-3439, DOI:10.1364/OE.23.003427.

〔学会発表〕(計4件)

Isamu Miyamoto, Novel Fusion Welding Technology of Si/Glass Using Ultrashort Laser Pulses with High Pulse Repetition Rates, 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics 2012, September 25, 2012, Anaheim, USA.

Yasuhiro Okamoto, Novel Micro-welding of Silicon and Glass by Ultrashort Pulsed Laser, 8th International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials, December 2, 2013, Las Vegas, USA.

Imaduddin Helmin bin Wan Nordin, Investigation of Micro-welding Characteristics of Si and Glass by Picosecond Pulsed Laser, First Smart Laser Processing Conference 2014 April 23, 2014, Yokohama, Japan.

Yasuhiro Okamoto, Effect of Wavelength and Pulse Duration in Laser Micro-welding of Glass and Monocrystalline Silicon, 15th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, June 18, 2014, Vilnius, Lithuania.

〔図書〕(計0件)

該当無し

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

該当無し

取得状況(計0件)

該当無し

〔その他〕

該当無し

6. 研究組織

(1)研究代表者

岡本 康寛 (OKAMOTO YASUHIRO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号: 40304331

(2)研究分担者

該当無し

(3)連携研究者

該当無し