

超短パルスベッセルビームによる高アスペクト TSV 加工技術

(独) 理化学研究所 光量子工学研究領域

ユニットリーダー 杉岡幸次

(平成 23 年度一般研究開発助成 AF-2011210)

キーワード：超短パルスレーザー, フェムト秒レーザー, ベッセルビーム, シリコン貫通ビア

1. 研究の目的と背景

電子機器の小型・高密度集積化を実現させるために、3 次元 Si LSI 実装技術の開発が急務となっている。その中で、特にシリコン貫通ビア (Through Silicon Via: TSV) 加工は Key 技術といわれ、近年世界的に注目されている¹⁾。この TSV 技術での Si 基板への穴あけ方法としては、現在ボッシュ法 (反応性イオンエッチングの一種)²⁾ が用いられているが、レジスト塗布→露光→現像→エッチング→レジスト剥離といったリソグラフィプロセスが必要となる。また Si ウェハ自体のエッチングとその表面に形成された絶縁膜 (SiO₂) のエッチングでは、反応性ガスの組成を変更する必要があり煩雑なプロセスとなっている。

TSV 作製工程において低価格化、高スループット化のために工程数を減らすことが緊急な課題となっており、近年ナノ秒紫外レーザーによる Si 穴あけ加工技術の研究もなされているが、現時点ではデブリの再付着や加工穴品質に問題があり実用化には至っていない。一方パルス幅がきわめて短い超短パルスレーザーを用いると、加工部周辺への熱影響層の生成を抑制でき、多様な材料に対して高品質アブレーション加工が実行できることが知られている³⁾。

ところで、TSV の加工には現状ビア径 $\Phi 50 \mu\text{m}$ 以下、アスペクト比 8 以上が要求されている。また将来的にはビア径 $\Phi 10 \mu\text{m}$ 以下、アスペクト比 5 以上が要求され、これを実現する高効率で高品質・高精度加工技術の開発が望まれている。しかし、ガウシアンビームをレンズで集光する通常のレーザー加工法では、集光したレーザー光の焦点深度の制約により穴径が小さくなればなるほど深穴加工は困難となり、微細で高アスペクト比の加工を行うためには、まだ数多くの課題が残されている。

そこで本研究では、ビームの自己干渉効果により微小な集光スポット (直径数 μm 程度) が長い距離 (数 mm 以上) 伝搬するベッセルビームを超短パルスレーザー加工に組み込むことを提案し、微細かつ高アスペクト比の TSV を作製することを試みた。ベッセルビームを用いる利点は、図 1 に示すように加工材料がレーザー光に対して透明であれば材料内部でもベッセルビームが形成されるため、テーパレスの微細高アスペクト比加工が実現できる点である。また焦点位置合わせが不要なことのもう一つの利点である。なお透明な波長で高品質加工を行なうには強い多光子吸収を誘起する必要があり、超短パルスレーザーの利用は必要不可欠である。

セルビームが形成されるため、テーパレスの微細高アスペクト比加工が実現できる点である。また焦点位置合わせが不要なことのもう一つの利点である。なお透明な波長で高品質加工を行なうには強い多光子吸収を誘起する必要があり、超短パルスレーザーの利用は必要不可欠である。

2. 実験方法

図 2 に、本研究で用いた実験装置の概略図を示す。前述のように、ベッセルビームの特長を活かしテーパレスの微細高アスペクト比加工を実現するためには、Si に対して透明な波長の超短パルスレーザー光を用いる必要がある。Si のバンドギャップは 1.12 eV であるため、波長は $1.13 \mu\text{m}$ より長くなくてはならない。そこでチタンサファイアレーザーフェムト秒再生増幅器から得られた超短パルス光を、光パラメトリック増幅器 (OPA) により $1.5 \mu\text{m}$ に変換したものを加工光源として用いた。変換された光のパルス幅は 50 fs、パルスエネルギーは $550 \mu\text{J}$ 、繰り返し周波数は 1 kHz である。その後、レーザーパルスはビーム径、エネルギー、照射パルス数を調整のための光学系を経由して、ベッセルビームを生成する変換光学素子アキシコンレンズに入射する。生成されたフェムト秒ベッセル

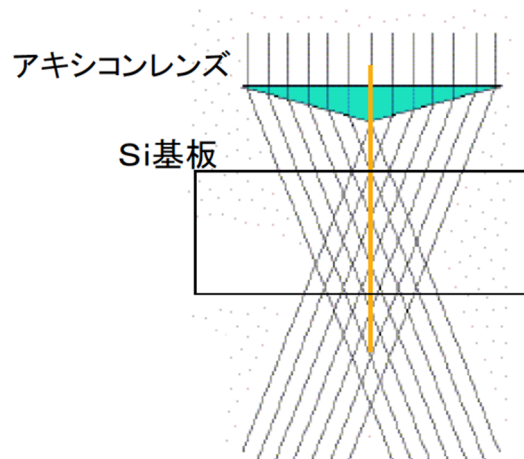


図 1 ベッセルビームによる Si の加工

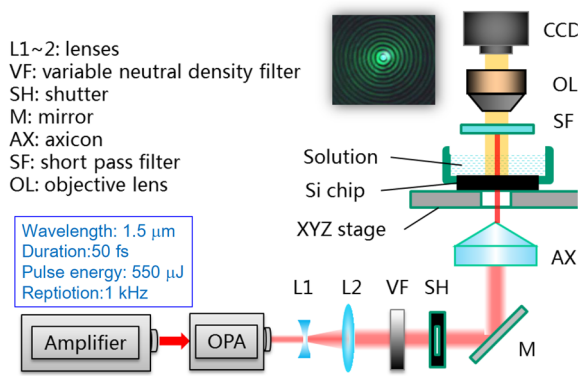


図2 1.5 μm フェムト秒ベッセルビームを用いた TSV 加工装置の概略図

ルビームは、xyz ステージ状に保持された Si 基板に照射され、TSV の形成を試みた。実験は、大気中ならびに Si 基板裏面に硝酸銀 (AgNO₃) 水溶液に浸した状態の 2 通り行った。また貫通穴が形成されたことを確認するために、大気中加工の場合はレーザー光入射側と反対方向 (Si 基板裏面側) より、CCD により加工中の観察を行っている。観察のための対物レンズの手前には、レーザー光が直接 CCD カメラに入射しないよう、長波長カットフィルターを挿入している。

本実験で用いたアキシコンレンズのアキシコン角は 20° であち、アキシコンレンズに入射したレーザービーム径 5mm から

得られるベッセルビーム (センターローブ) の径は 6.8 μm と計算される。

3. 研究成果

3.1 大気中加工

図3に、50 μm厚の Si 基板に対して、異なるパルスエネルギーで TSV を作製した際の、基板表面 (上) および裏面 (下) の光学顕微鏡写真を示す。照射パルス数は、パルスエネルギーが 360 μJ のときが 500、250 μJ が 800、187 μJ が 1000 パルスである。パルスエネルギーが小さくなるにつれて、TSV の穴径は小さくなっている。一方どのパルスエネルギーにおいても、表面と裏面に形成された TSV の穴径はほぼ同じであり、テーパレスの TSV が形成できたことを示している。

図4に、50 μm厚の Si 基板に対して、基板表面ならびに裏面に形成された TSV の穴径のパルス数依存性を、異なるパルスエネルギーにおいて調べた結果を示す。TSV が形成されるしきい値のパルス数は、パルスエネルギーが 360 μJ のときが 300、250 μJ が 550、187 μJ が 650 パルスである。すなわちこれらのパルス数より少ない場合は、貫通穴は形成されない。パルスエネルギーが 360 μJ ではパルス数が 500~650、250 μJ では 650~800、187 μJ では 700~1000 の範囲で表面と裏面の穴径がほぼ一致しており、これらの範囲でテーパレス TSV の作製が可能なが分かった。これらの範囲において穴径はそ

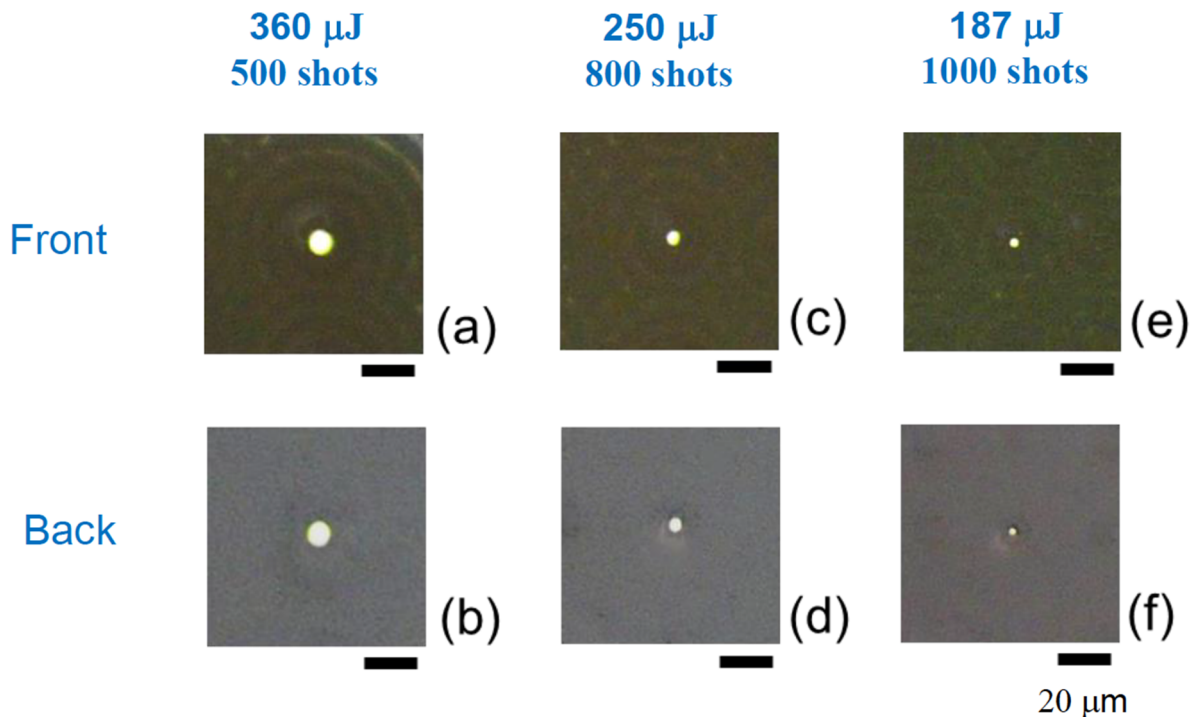


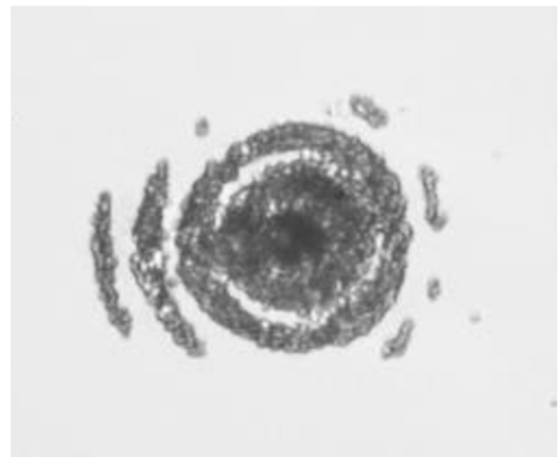
図3 50 μm厚の Si 基板に対して、大気中異なるパルスエネルギーとパルス数 (左から 360 μJ-500 パルス、250 μJ-800 パルス、187 μJ-1000 パルス) で TSV を作製した際の、基板表面 (上) および裏面 (下) の光学顕微鏡写真。



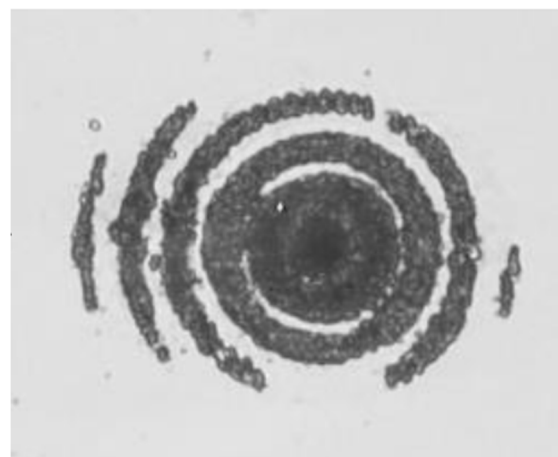
図4 50 μm厚のSi 基板に対して、基板表面ならびに裏面に大気中で形成された TSV の穴径のパルス数依存性 ((a) 360 μJ、(b) 250 μJ、(c) 187 μJ)。

それぞれ約 8 μm、6 μm、3 μmであり、アスペクト比では 6.3、8.3、16.7となる。このようにSi に対して透明な 1.5 μmの波長のフェムト秒パルスレーザーを用いて大気中でアブレーション加工することにより、微細かつ高アスペクト比でテーパレスの TSV を形成することに成功した。

パルスエネルギーが 360 μJ の場合、テーパレス TSV の作製に必要な最小のパルス数は前述のように 500 パルスである。レーザーの繰り返し周波数は 1kHz であるため、1つの TSV 作製に要する時間は約 0.5 秒と見積もられる。すなわち TSV 作製速度は 2 ピア/秒であり、実用的な速度 (100 ピア/秒) から比較すると遥かに遅い。スループットを向上するには、多点一括加工、繰り返し周波数の増加、あるいはその両方の組み



10 μm



10 μm

図5 Si 基板裏面を 0.5M/L の硝酸銀溶液に接触させ、フェムト秒パルスレーザー照射によって加工 (溶液支援加工) を行った 500 μm厚のSi 基板の表面と裏面の光学顕微鏡写真。パルスエネルギーは 50 μJ、レーザー光の照射時間は 10 分。

合わせが考えられる。ただし繰り返し周波数を増加した場合は熱の蓄積効果が問題となるので、検討が必要である。

3.2 溶液支援加工

上述のスループット向上を実現するには、加工を行うパルスエネルギーを低減する必要がある。一方大気中加工の場合、Si 基板の厚さが厚くなってくると、いくらパルスエネルギーを増加しても TSV を形成することができなくなる。これはパルスエネルギーを増加したことにより、Si 内部でパルスレーザーを形成すべき光線が、その位置に達する前に Si に多光子

吸収されてしまうためと考えられる。従ってSi内部の深い位置でもベッセルビームを形成するためには、形成前に多光子吸収が生じないよう、十分パルスエネルギーを小さくしておく必要がある。

そこで加工に必要なパルスエネルギーを低減するため、Si基板裏面を0.5M/Lの硝酸銀溶液に接触させ、フェムト秒ベッセルビームの照射を行った。図5に、加工を行った500 μ m厚のSi基板の表面と裏面の光学顕微鏡写真を示す。硝酸銀溶液を用いた場合、硝酸銀の光分解を避けるために暗室で照射を行ったため、裏面側からの加工観察ができない。そこで十分な加工を行うため、レーザ光の照射時間は10分とした。パルスエネルギーは50 μ Jと大気中アブレーションの場合より1桁程度小さいが、500 μ m厚のSi基板に対してTSVを形成することに成功した。この時の穴径は約5 μ mであり、アスペクト比としては約100が達成された。このように溶液支援により加工に必要なエネルギーを大幅に低減できるのは、硝酸銀溶液が1.5 μ mの波長に対して線形吸収があるため、フェムト秒レーザ光が1光子吸収によって効率よく吸収され、そのエネルギーがSi基板に移譲されたためと考えられる。つまりナノ秒レーザによる透明材料加工技術として広く知られているレーザ誘起背面湿式エッチング(Laser-Induced backside Wet Etching: LIBWE)⁴⁾あるいはレーザ生成プラズマ支援アブレーション(Laser-Induced Plasma-Assisted Ablation: LIPAA)⁵⁾と類似のメカニズムであると推測される。

TSVの形成以外にその周辺にベッセルビームのサイドローブによる加工痕が観察されるが、この除去は今後の課題である。

4. 結論

本研究では、微細かつ高アスペクト比のTSVを作製することを目的とし、ビームの自己干渉効果により微小な集光スポット(直径数 μ m程度)が長い距離(数mm以上)伝搬するベッセルビームに空間整形した超短パルスレーザを用いて加工を試みた。このときSi基板内部でもベッセルビームを形成するためには、フェムト秒レーザ光はSiに対して透明である必要がある、OPAにより1.5 μ mに波長変換したレーザ光を用い

た。大気中においてアブレーション加工を行った結果、50 μ m厚のSi基板に対して、穴径3~8 μ mのテーパレスのTSVの作製に成功した。これらのTSVのアスペクト比は16.7~6.3であり、次世代のTSVに要求されるビア径 Φ 10 μ m以下、アスペクト比5以上という条件を十分満たしている。また1つのTSV作製時間は0.5秒程度であった。さらにSi基板裏面を0.5M/Lの硝酸銀溶液に接触させた溶液支援加工では、加工に必要なパルスエネルギーを大幅に低減することができた。これにより500 μ m厚のSi基板に対しても穴径5 μ mのTSVを形成することができ、アスペクト比100を達成した。これらの成果により、本手法が微細かつ高アスペクト比のTSVの作製に非常に有効であることを示すことができた。

本研究で得られた成果はまだ予備的なものであり、今後TSV作製条件(レーザのパルス幅、波長、繰り返し周波数、溶液支援加工における溶液の種類や濃度、etc.)を最適化することにより、さらに高品質かつ高効率なTSV作製技術が確立するものと期待される。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団平成23年度一般研究開発助成(AF-2011210)を受けて遂行されたものであり、ここに深く感謝の意を表す。また本研究テーマの共同研究者である中国科学院上海光学精密機械研究所のYa Cheng教授ならびにFei He博士に心から感謝する。

参考文献

- 1) 吉永孝司・野村 稔: 科学技術動向, 109 (2010), 23-64.
- 2) B. Wu, A. Kumar, and S. Pamarthy: J. Appl. Phys., 108 (2010) 051101.
- 3) K. Sugioka and Y. Cheng: Light: Sci. & Appl., 3, (2014) e149.
- 4) J. wang, H. Niino, and A. Yabe: Appl. Phys., A69, (1999) S271-S273.
- 5) Y. Hanada, K. Sugioka, I. Miyamoto, and K. Midorikawa: J. Appl. Phys., 99, (2006) 043301.