



K. Sugioka

最適化した超短パルスベッセルビームによる 高品質・高アスペクト Si 貫通穴の形成

杉岡 幸次*

1. まえがき

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、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⁾。

TSV 加工では現状ビア径 $\Phi 50 \mu\text{m}$ 以下、アスペクト比 10 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加工法では、集光したレーザ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も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、超短パルスレーザの利用は必要不可欠である。一方、アキシコンレンズによって生成したベッセルビームを用いて TSV 加工を行った場合、ベッセルビームのサイドローブによる損傷が生じるといった問題が生じる。そこでバイナリー構造の位相板とアキシコンレンズを組み合わせることによりフェムト秒ベッセルビームを最適化し、サイドローブによる損傷を抑制した高品質・高アスペクト比の TSV 加工も試みた⁴⁾。

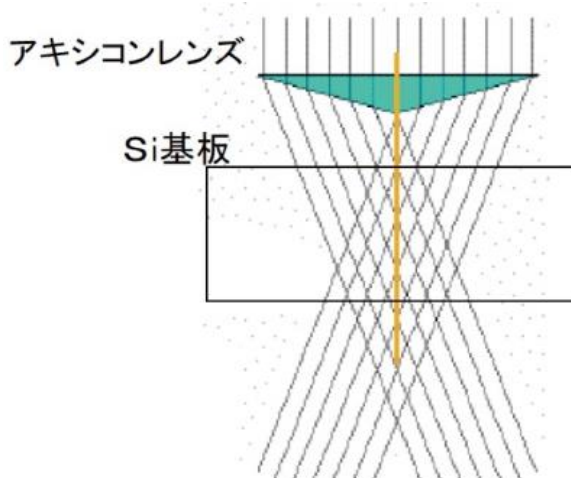


図 1 ベッセルビームによる Si の加工

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光を用いる必要がある。Si のバンドギャップは 1.12eV であるため、 $1.13 \mu\text{m}$ より長い波長において Si は透明である。そこでチタンサファイアレーザ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 50fs、パルスエネルギーは $550 \mu\text{J}$ 、繰り返し周波数は 1kHz である。その後、レーザパルスはビーム径、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

*理化学研究所光子工学研究領域 理研-SIOM 連携研究ユニット ユニトリリーダー

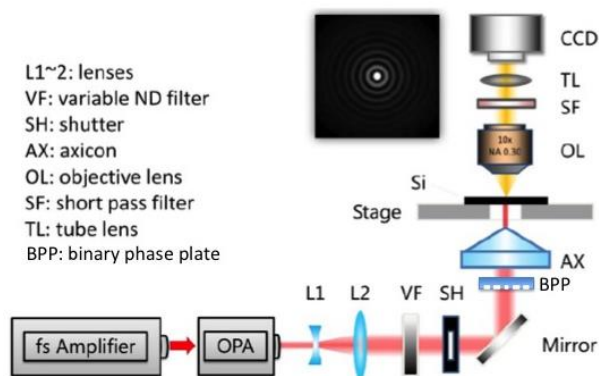


図2 1.5 μm フェムト秒ベッセルビームを用いた TSV 加工装置の概略図

ズに入射される。生成されたフェムト秒ベッセルビームは、xyz ステージ状に保持された Si 基板に大気中で照射され、TSV の形成を試みた。また貫通穴が形成されたことを確認するために、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。観察を行うための対物レンズの手前には、フェムト秒レーザー光が直接 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° であり、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 (セントラルローブ) の径は 6.8 μm と計算される。

さらにベッセルビームのサイドローブによる損傷を抑制することを目的として、ベッセルビームを最適化するために、バイナリー構造の位相板をアキシコンレンズの手前 5mm の位置に設置した加工も試みた。

3. 実験結果

3.1 通常のベッセルビームによる TSV の作製

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

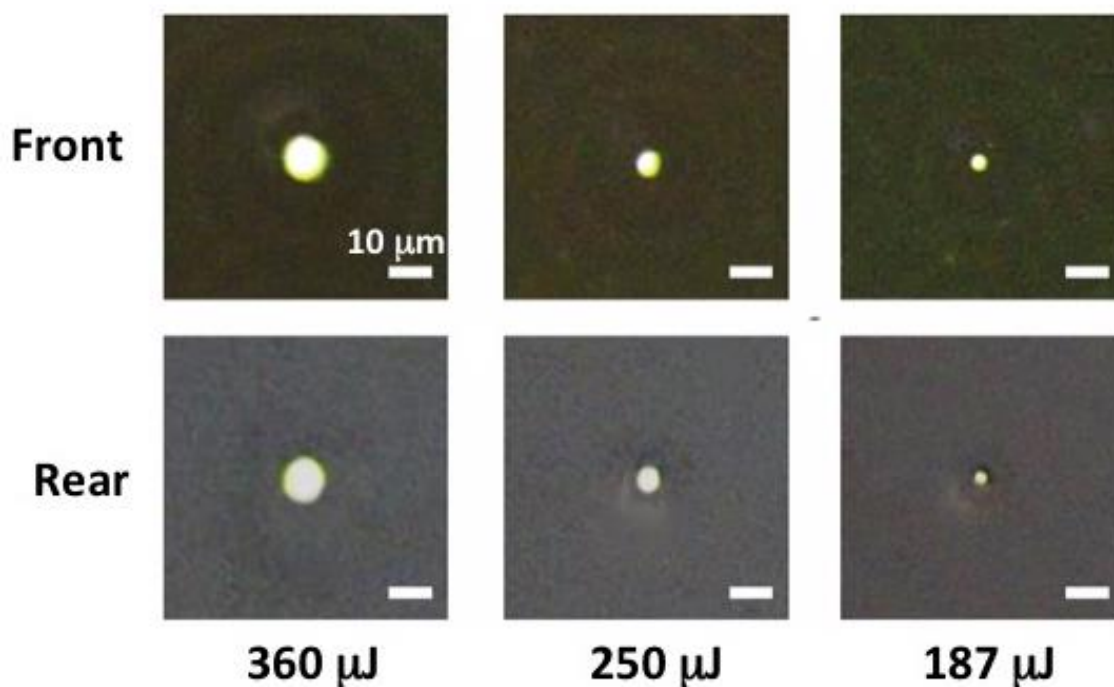


図3 50 μm 厚の Si 基板に対して、大気中異なるパルスエネルギーとパルス数 (左から 360 μJ-500 パルス, 250 μJ-800 パルス, 187 μJ-1000 パルス) で TSV を作製した際の、基板表面 (上) および裏面 (下) の光学顕微鏡写真

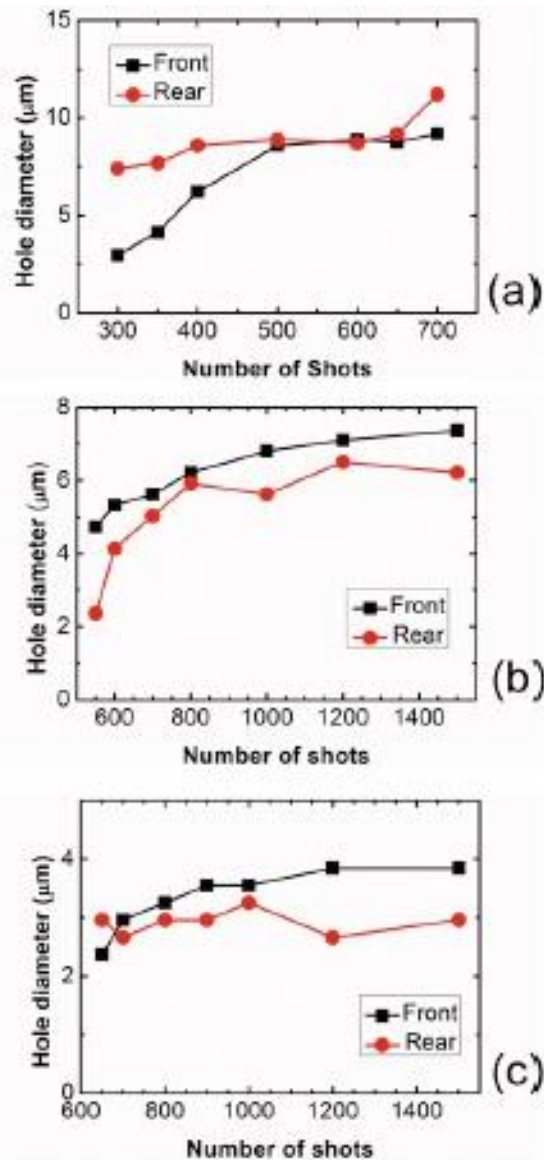


図4 50 μm 厚の Si 基板に対して、基板表面ならびに裏面に大気中で形成された TSV の穴径のパルス数依存性 ((a) 360 μJ , (b) 250 μJ , (c) 187 μJ)

かった。これらの範囲において穴径はそれぞれ約 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ベッセルビーム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。

図5に、50 μm 厚の Si 基板に対して、パルスエネルギー280 μJ 、1000 パルスで作製した TSV の断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した結果を示す。上で述べたように、ほぼテーパレスで高アスペクト比の TSV が形成されているが、TSV の周辺に同心円状の損傷が生じている。このような損傷は、ベッセルビームのサイドローブにより発生したと考えられる。なぜなら、後述するように通常のベッセルビームではサイドローブのエネルギーが比較的高いた

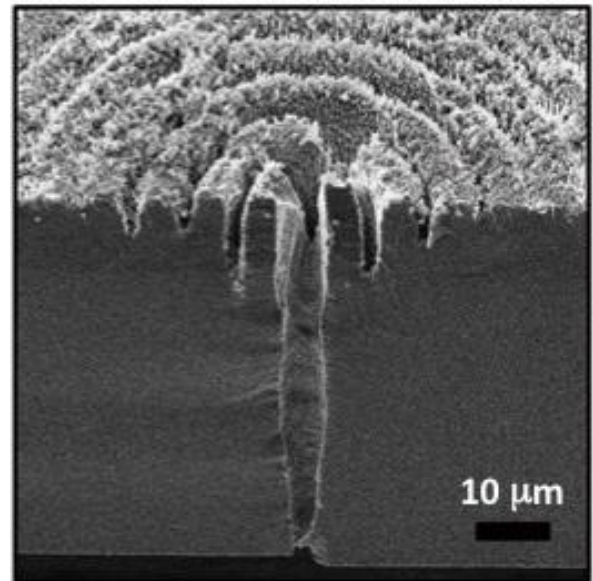


図5 50 μm 厚の Si 基板に対して、パルスエネルギー280 μJ 、1000 パルスで作製した TSV SEM 断面写真

めである (図7d 参照)。

3.2 最適化したベッセルビームによる TSV の作製⁴⁾

前項で述べたように、アキシコンレンズにより形成した通常のベッセルビームでは、サイドローブによる損傷が生じてしまい、実用化への障害となる。そこで、バイナリー構造の位相板をアキシコンレンズと組み合わせることにより、サイドローブエネルギーを低減し、ベッセルビームを最適化することを試みた。アキシコンレンズと位相板を組み合わせると、セントラルローブのエネルギーをサイドローブに移譲することができ、超解像度を実現できることが報告されている⁵⁾。我々はこれとは逆の発想で、位相板によりサイドローブエネルギーをセントラルローブに移譲することを考えた。アキシコンレンズと組み合わせる位相板はどのような種類のものでも構わないが、設計および制作が最も簡単なバイナリー構造のものをここでは採用した。代表的なバイナリー構造の位相板は、図6に示すような透明基板中に同心円状の溝構造を有している。溝の深さは、入射する光の波長に対して位相差 π を生じさせるよう設定する。我々は、位相板の基板としてBK7 ガラス (屈折率 1.50@1.5 μm) を用いたため、波長 1.5 μm のレーザー光に位相差 π を生じさせる溝の深さは 1.5 μm となる。バイナリー構造の位相板を設計するには、溝の数とそれぞれの溝の内径・外径を決定するだけで良い。まず理論的な数値解析を行うために、位相板とアキシコンレンズを透過したレーザー光の空間強度分布を計算する式を導出した。得られた式を元にシミュレーションを行い、位相板のデザインの最適化を行う。最適化手続においては、シミュレーテッドアニーリング (SA) アルゴリズムを採用した。最適化ア

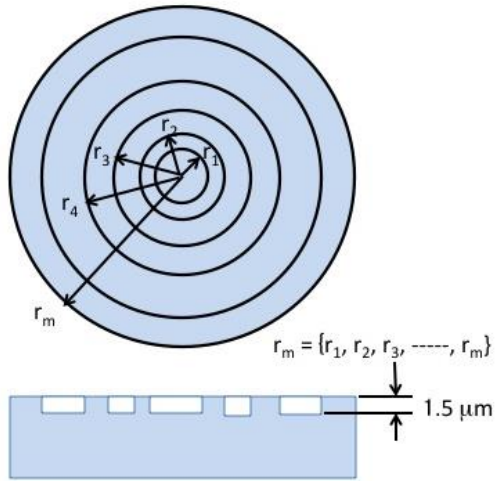


図6 本研究で用いたバイナリー構造の位相板の模式図

ルゴリズムにおいて、探索ウィンドウの幅（収束条件を満たすセントラルローブの長さ）を $50\mu\text{m}$ および $100\mu\text{m}$ に設定し、2つの異なる位相板を設計した。前者を BPP1 ($r_m = \{78.7, 130.5, 225.6, 1823.6, 1872.4\} \mu\text{m}$)、後者を BPP2 ($r_m = \{145.5, 185.0, 200.0, 1695.8, 1919.5\} \mu\text{m}$) と呼ぶ (r_m は図6 参照)。

図7に、シミュレーションにより求めた通常のベッセルビーム (a, d)、BPP1 (b, e) および BPP2 (c, f) により整形したベッセルビームの空間強度分布を示す。通常のベッセル

ルビームの1次のサイドローブエネルギーとセントラルローブエネルギーの比（サイドローブエネルギー比）は15.6%とかなり大きい。一方位相板を用いることによりサイドローブエネルギー比は BPP1 で2.2%、さらに BPP2 を用いると0.6%まで低減できる。しかし焦点深度も通常のベッセルビームの12.4mm から、BPP1 では $530\mu\text{m}$ 、BPP2 では $280\mu\text{m}$ に減少する。但し BPP2 の焦点深度 $280\mu\text{m}$ は、TSV の作製に応用するには十分に長い。さらに、後述するように焦点深度が短くなると TSV 作製に必要なパルスエネルギーを低減できるといった利点もある。これによりプロセス効率も向上させることができる。

最適化アルゴリズムにより設計したデザインを元に、BK7 ガラス基板にフォトリソグラフィとフッ酸溶液によるウェットエッチングにより2種類の位相板を作製した。作製した位相板を用いて整形したベッセルビームの特性を実験的に評価したが、ほぼシミュレーションと同等の結果が得られた。

作製した位相板を用いて整形したベッセルビームにより、 $50\mu\text{m}$ 厚の Si 基板に TSV を作製することを試みた。比較のため、集光したガウシアンビームおよび通常のベッセルビームで加工した結果も示す。図8は、各ビームにより作製された TSV の断面 SEM 写真である。ガウシアンビームを用いた場合は、TSV の径が表面で約 $20\mu\text{m}$ となり、アスペクト比にすると2.5程度となる。またかなり大きなテーパ構造が形成されている。通常のベッセルビームは高アスペクト比の TSV の形成が可能であるが、Si 基板表面に

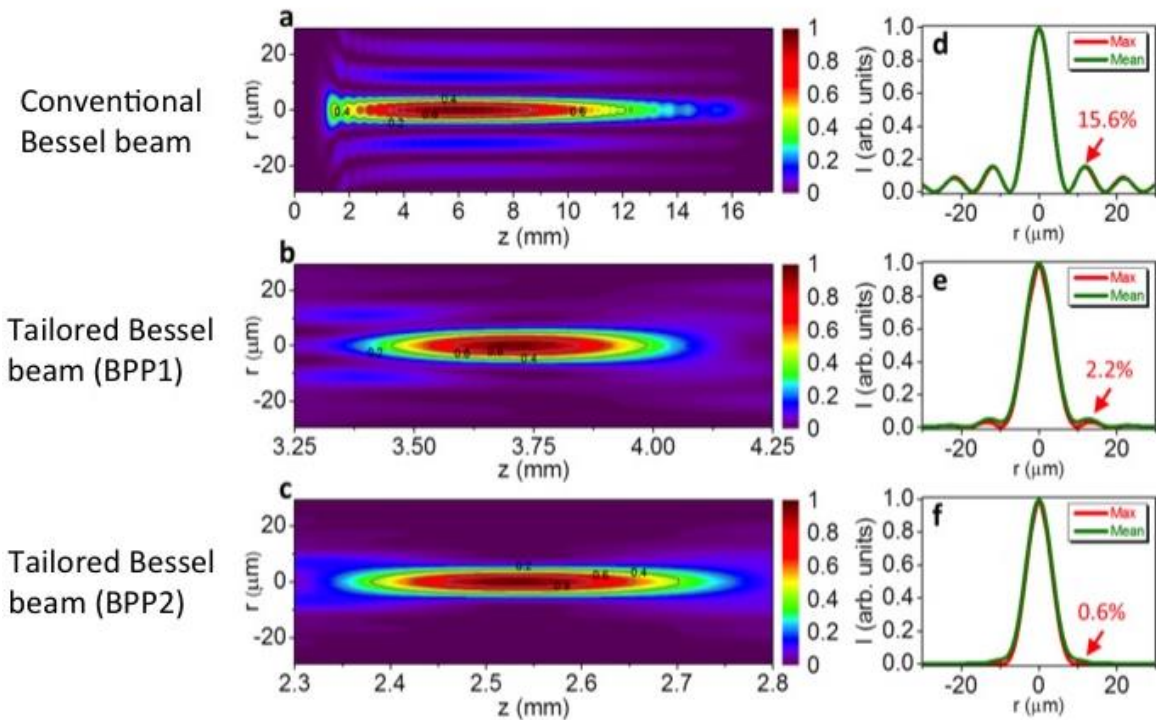


図7 シミュレーションにより求めた通常のベッセルビーム(a, d)、BPP1(b, e)および BPP2(c, f)により整形したベッセルビームの空間強度分布

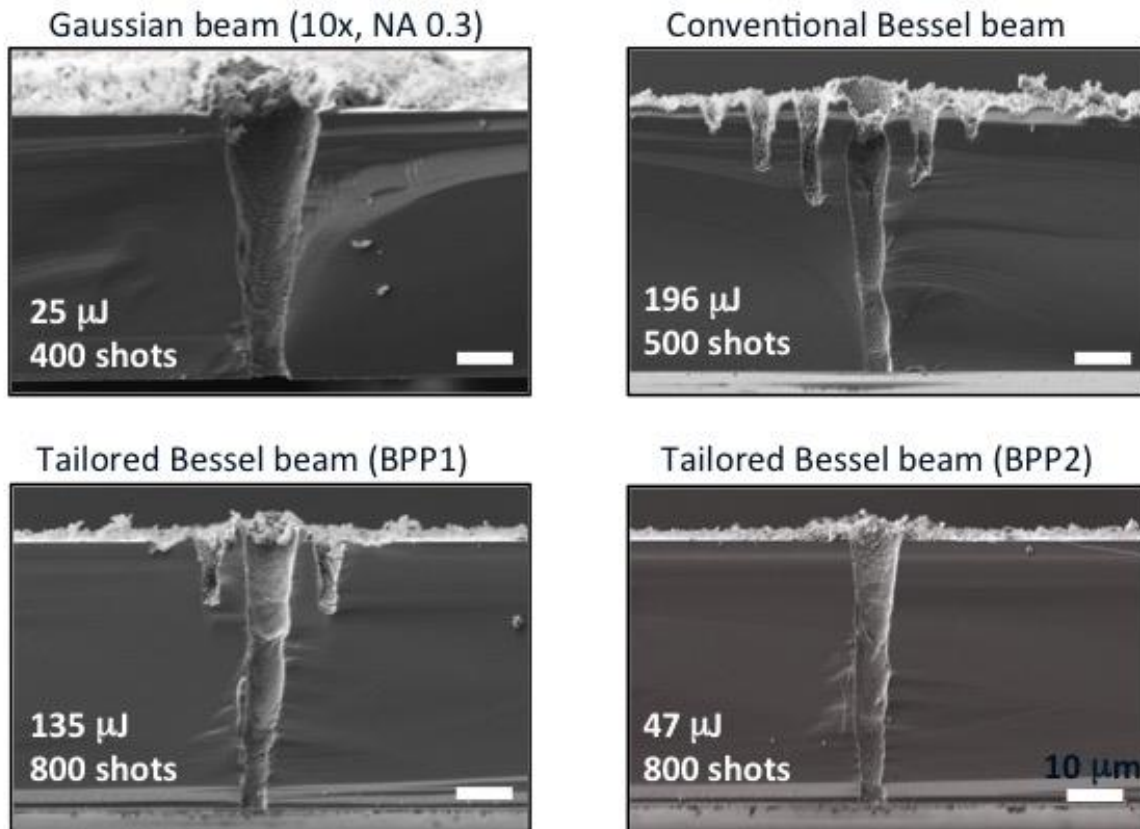


図8 各ビーム（左上：ガウシアンビーム，右上：通常のベッセルビーム，左下：BPP1により整形したベッセルビーム，右下：BPP2により整形したベッセルビーム）により50 μ m厚のSi基板に作製されたTSVの断面SEM写真

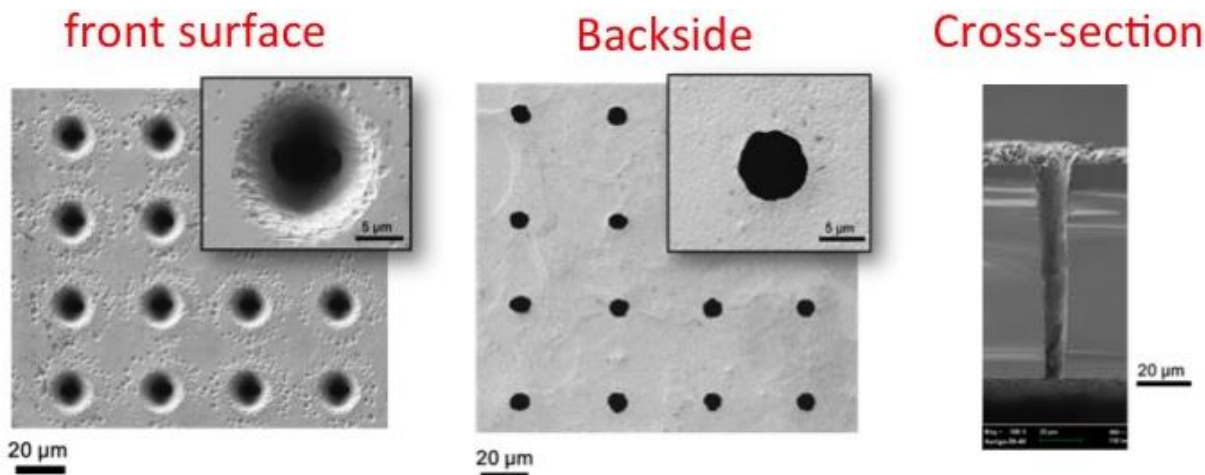


図9 100 μ m厚のSi基板に対し、BPP2により整形したベッセルビームを用いて作製したTSVの2次元アレイ構造のSEM写真（左：表面，中央：裏面，右：断面）

深刻なサイドローブ損傷が生じる。位相板を用いて整形したベッセルビームでは、サイドローブ損傷は飛躍的に低減できる。しかし、BPP1を用いた場合は1次のサイドオーブによる損傷は依然生じている。一方BPP2を用いるとサイドローブ損傷は完全に抑制され、アスペクト比7程度の高品質なTSVを作製することができた。さらに注目すべきことは、BPP2を用いると通常のベッセルビームと比較し

てTSVの作製に必要なエネルギーを約1/4（196 μ J \rightarrow 47 μ J）に低減できることである。これは焦点深度が短くなったことに起因する。よって位相板によりベッセルビームを整形することは、プロセス効率を向上する上でも重要である。

次に、100 μ m厚のSi基板にTSVを作製することを試みた。通常のベッセルビームならびにBPP1により整形した

ベッセルビームでは、 $100\mu\text{m}$ 厚のSi基板にTSVを形成することはできなかった。これはサイドローブがSi基板表面で多光子吸収を起こし、Si基板内の深い領域でセントラルローブを形成できなかったためと考えられる。一方、BPP2により整形したベッセルビームを用いることにより、図9に示すようにサイドローブ損傷の全くない高品質・高アスペクト比(~ 15)のTSVの2次元アレイを作製することに成功した。

4. まとめ

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 μm 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ー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、フェムト秒レーザー光はSiに対して透明である必要があり、OPAにより $1.5\mu\text{m}$ に波長変換したレーザー光を用いた。大気中においてアブレーション加工を行った結果、 $50\mu\text{m}$ 厚のSi基板に対して、穴径 $3\sim 8\mu\text{m}$ 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 $16.7\sim 6.3$ であり、次世代のTSVに要求されるビア径 $\Phi 10\mu\text{m}$ 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。

一方、アキシコンレンズのみを用いて形成した通常のベッセルビームは、サイドローブによる深刻な損傷を発生させる。そこでバイナリー構造の位相板をアキシコンレンズと組み合わせ、ベッセルビームを整形することを提案し、TSVの作製に応用した。位相板のデザインを最適化することにより、 $100\mu\text{m}$ 厚のSi基板に対しても、サイドローブ損傷の全くない高品質・高アスペクト比(~ 15)のTSV作製に成功した。

本技術の将来の実用化に向けては、まだ幾つかの課題が残されている。最も大きな課題はプロセス速度(スループット)である。実用的には、スループットとして1,000穴/秒が要求されている。現在我々の手法では1つのTSVを形成するのに500~1,000パルス必要である。本研究で

は1kHzの繰り返し周波数のレーザーを用いているため、スループットは1~2穴/秒であり、産業界からの要求には程遠い。しかし我々は、繰り返し周波数を数百kHzまで増加しても加工品質は劣化しないと考えている。なぜなら、フェムト秒レーザー加工においては、数百kHzまでは多パルス照射しても熱の蓄積効果はないからである⁶⁾。従って繰り返し周波数数百kHzのレーザーを用いることにより、単純に見積もってスループットを2桁向上することができる。さらにマルチビーム並列加工を採用することによりスループットのさらなる向上が期待でき、産業界の要求を満たすことが期待される。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成(AF-2011210)により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。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博士に心から感謝いたします。

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) F. He, J. Yu, Y. Tan, W. Chu, C. Zhou, Y. Cheng, and Koji Sugioka: Sci. Rep. DOI: 10.1038/srep40785 (in press).
- 5) J. Jia, C. Zhou, X. Sun, and L. Liu: Appl. Opt. **43**, (2004) 2112-2117.
- 6) S. Eaton, H. Zhang, P. Herman, Y. F. Oshino, L. Shah, J. Bovatsek, and A. Arai: Opt. Express **13**, (2005) 4706-4716.