# SiC 基板のポスト SMT 実装を睨んだ YAG レーザ TSV 加工技術開発

東京工業大学 機械制御システム専攻 准教授 伏信一慶 (平成 24 年度一般研究開発助成 AF-2012207)

キーワード: YAG レーザ、SiC 基板、TSV 加工

## 1. 背景、目的と構成

半導体実装の現場では高密度実装の要請から実装の3 次元化にかかる取り組みが進んでおり、Si基板を対象と した様々な技術開発が行われている。こうした中、米国 では早くも SiC 基板の様々な面での優位性に鑑みて、Si を SiC に置き換えたとした場合に必要となるすべての実 装技術の洗い出しが始まっている。我が国では初期から の基板材料開発の取り組みにドライブされてパワー半導 体を中心にデバイス開発と商品化が進んでおり、今後の さらなる市場展開が期待され、将来的な MEMS 等への展 開への期待にも鑑みて、米国と同様にその実装技術開発 への力強い取り組みが重要と考える。

そこで重要となる取り組みの一つとして TSV (through silicon via, through substrate via) 加工技術に着目する。 実装密度をあげるためには基板を貫通する微細穴加工が 肝要であるが、従来の表面プロセスの延長を前提とする 限り、エッチング速度の決定的な遅さがネックとなり、 また穴加工の品質にも鑑みて、基板の thinning 等の対応 を避けて通れない。

本研究ではパルスレーザ加工の高度化による SiC 基板 への TSV 加工技術開発に資する検討を行う。パルスレー ザ加工ではその加工品質にも鑑みてフェムト秒レーザの 導入の期待は大きいところであるが、コストやハンドリ ング、実績の大きなメリットを考えて Nd:YAG レーザの ナノ秒パルスによる加工の高度化を検討する。ここでは デブリや熱影響、また SiC 基板固有の課題としての基板 の割れといった課題をあげることができるが、基礎的な 取り組みを通じてこれらの課題解決に資する技術シーズ の提供を図る。

申請書の記載に従い、研究は大きく3つの取り組みを 総合することで実施した。すなわち、YAG レーザを用い た加工実験、in situ / ex situ での可視化観察、ならびに 理論モデルの構築と数値計算である。

#### 2. 加工実験

図1に加工実験の実験装置を示す。パルス幅6ns程度のNd:YAGレーザを用い、パルスエネルギーを調整の上で試料に照射する。波長は最も扱いやすい1064nmとしている。試料には4H-Nポリタイプ、Si面CMP仕上げの単結晶SiC基板を用いた。なお試料は窒素ドープが施

されており、表面で 1.8×10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>、バルクで 1.6×10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> である。試料雰囲気は大気と蒸留水とで行った。加工後 の試料表面観察にはレーザ顕微鏡と SEM を用いている。



図1 加工実験の実験装置

図2は焦点位置のデフォーカス量を表す。周囲雰囲気 を水とした場合には非線形光学効果によるフォーカシン グとデフォーカシングが生起するため、図中に点線で示 した線形屈折率のみを考慮した場合に比べると焦点位置 に変化が見られる。



図3に代表的な加工特性を示す。左はフルーエンスを 12.5 J/cm<sup>2</sup>と固定して、パルス数に対する加工深さを計測 したものである。図のようにパルス数の増加とともに加 工深さは上に凸の傾向を示していくことがわかり、水中 の方が大気中に比して全般に深さが小さく、また水膜厚 さとともに減少していくことがわかる。これには焦点位 置の問題に加えて、水中で生起するプラズマの影響と生 成気泡の影響と考えられる。

右の図は2048パルス照射時のパルスあたりの加工深さ をプロットしたものであるが、フルーエンスの増加とと もに水膜厚さの影響が顕著になっており、上記の理由に よる影響と合致する結果となっている。また水膜厚さの 増大とともに加工特性に不安定さを示す結果となってい る。



図3 加工特性(左:パルス数と加工深さ、右:加工速 度と水膜厚さ)

図4は2048パルス照射後のビア直径をレーザフルーエ ンスに対してプロットしたものであり、水中ではフルー エンスに大きく依存しないのに対して、大気中では10 J/cm<sup>2</sup>を越えたあたりから大きく増加していくことがわ かる。後者の特徴は穴周辺に発生するクラックに起因す るものであり、水中の方が幅広いフルーエンス範囲でク ラックのない加工が可能であることも示している。



図4 ビア直径とレーザフルーエンス

フルーエンスとパルス数の増加とともにやがてはクラ ックを生じて加工品質上の問題となるが、図5はクラッ クの生じた条件をレーザフルーエンスとパルス数とでマ ッピングしたものである。図のように、フルーエンスを 絞ることでクラックの発生を回避する条件を見いだすこ とが可能であり、加工穴の深さについてはパルス数をパ ラメータとして検討すべきと考えられる。



図5 試料にクラックの生じる条件のマッピング

図6は加工後の試料表面のSEM写真である。(a)は大 気中での結果であり、加工穴周辺にニュートンリング様 の模様が見えており、一方で(b)の水中での加工後の試料 にはこれが認められず、(c)は大気中の加工穴周辺の拡大 図であるが、図のように、左上のデブリの剥離したと考 えられる部位があることから、水中加工の場合には加工 穴周辺のデブリの堆積が回避できることがわかる。



図 6 加工後試料表面の SEM 画像: (a)大気中、(b)水中、 (c)大気中穴付近拡大

また図7は加工後の加工穴周辺の EPMA 分析結果であ り、大気中ではOが多量に認められるのに対し、水中で はほとんどその存在が認められない。図6の結果との比 較から、飛散した酸化物の堆積の抑制が水中で期待でき る効果であることが考えられる。



(a) 大気中



(b) 水中図7 加工後試料表面の EPMA 分析

図8は加工穴の形状を容易に可視化するため、加工穴 で形どった樹脂のSEM画像を示す。大気中の加工ではし ばしば報告されるような複雑な形状を示すのに対し、水 中では比較的単純な形状で加工が進んでいることがわか る。



図8 加工穴で形どった樹脂の SEM 画像 左:大気中、8.3 J/cm2、右:水中、厚さ 1.0 mm、23.6 J/cm2 いずれも 2048 パルス

#### 3. 高速度可視化実験

加工時の飛散物の挙動をみるため、高速度の可視化実 験を行った。図9がその実験装置であり、前出の Nd:YAG レーザと、YAG レーザのパルスシェイピングを行うため の DPSS レーザ1、およびシャドーグラフ用の DPSS レ ーザ2 の3本のレーザを用いる。

従来からディレーをかけることでトリガーとなる加工 用レーザパルスを基準に時刻をずらした高速度可視化は 多数あったが、これでは一連の現象を捉えることができ ないため、今回はフレームレート2億 fpsの高速度ビデオ カメラ (NAC ULTRA Neo)を用いた。これにより5 ns の間隔で12枚の連続する画像を撮像することができる。 撮影は自発光による映像と、シャドーグフラフの双方を 用いている。



図 9 高速度可視化実験装置

図10に代表的な可視化事例を示す。図中左側からレ ーザ光が入射し、右側にある試料から飛散物が左向きに 飛び出す。図のように、自発光強度は照射から数十 ns で ピークを示し以後減衰していることがわかる。まだシャ ドーグラフにより屈折率変化に起因すると考えられる波 面が観察される。



図10 代表的な可視化事例(上:自発光、下:シャド
ーグラフ) E = 28 mJ, F = 39 J/cm<sup>2</sup>

図11はパルスエネルギーを高めた場合の結果であり、 自発光の強さと継続時間、シャドーグラフによる領域の 広さともに増大していることが見て取れる。



図11 高パルスエネルギー(E=57 mJ, F=81 J/cm<sup>2</sup>)

また、図12はビームプロファイルを変えた場合の結 果で、環状にした場合である。図のように、とりわけ初 期の特徴的なふたこぶとそれらが干渉することによる先 端部の複雑な波面が見て取れる。



E = 28 mJ 図12 ビームプロファイル (環状)

# 4. 理論モデリング

飛散状況を理論的に検討するためのモデリングを行っ た。加工対象試料の溶融、流動、除去を数値的に再現す る。連続の式、運動量保存の式、エネルギー保存の式か らなる基礎方程式は以下の通りである」

$$\begin{split} &\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \\ &\frac{\partial\alpha_i}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_i \vec{u} = \frac{\alpha_i \psi_i}{\rho_i} \frac{Dp}{Dt} + \frac{\dot{m}}{\rho_i} \\ &\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla \tau + \vec{S} + \vec{F} \\ &\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} E) + p \nabla \cdot \vec{u} = \nabla (\lambda \nabla T) + Q \end{split}$$

対象とする系を図13に示す。



図13 モデリングの対象とする系

図14は代表的な計算結果を示す。いずれも上から温 度、圧力、密度の分布を示し、加工用レーザにガウシア ンと環状プロファイルを用いた場合の計算結果である。 特に環状分布に固有な分布の特徴を再現できていること がわかる。



(a)ガウシアン



図14 計算結果

### 5. まとめ

以上の検討をもとに、Nd:YAG レーザによるビア加工 の高度化の可能性を示すことができた。また検討の過程 で、ビームプロファイルが加工特性に影響を及ぼす可能 性が見えてきたことから、Nd:YAG レーザによる新たな 加工技術開発の可能性が見えてきた。今後、ビームプロ ファイルの可変技術を援用することで、加工実験と ex situ 評価、in situ 高速度可視化、数値計算を統合した取 り組みにより、さらなる ns パルスレーザ加工技術の高度 化に取り組んでいく必要がある。

## 参考文献

- Iwatani et al., Int. J. Heat and Mass Transfer, 71, 515-520 (2014)
- 2) Doan et al., Prof. 2014 ITherm, 1279-1284 (2014)
- 3) OPTRONICS、 33(4), 173 (2014)
- 4) 伏信、日刊工業新聞、2015.3.20 第2部、(2015)