

# レーザーによる極細深穴あけと穴内面の機能化

千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻機械系コース

准教授 比田井 洋史

(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013203)

キーワード：レーザー穴あけ，機能化，成膜

## 1. 研究の目的と背景

近年は、半導体素子を多層化することにより、集積度を高める方法が用いられている。これらの層間の接続は穴あけののちに、メッキにより内面に銅などを充填することで行われている<sup>1)</sup>。ガラスインターポーザー<sup>2)</sup>、プリント基板<sup>3)</sup>などでも層間の導通を取るために穴あけの後に、内面成膜を行う同様なプロセスが利用されている。しかしながら、微細化が進んでいるため、スルーホール電極における貫通孔の径も小さくなってきておりこれらの小さな径の貫通孔の内周面に均一な厚みの金属膜を形成することは容易ではない。

このようなスルーホールへの穴あけ方法の 1 つとしてレーザーによる穴あけがある<sup>4)</sup>。プリント基板の穴あけなどには広く利用されている<sup>5)</sup>。このレーザーによる穴あけでは、パルスのレーザー光を照射して、除去を行う。この際、穴の底部から除去され、飛散した材料が周囲に再堆積するが、穴の内部に再度堆積することが知られている<sup>6)-7)</sup>。他には被加工材を穴あけ時に分解する方法も提案されている。具体的には、AlN を穴あけ時に分解することにより内面に Al 導電膜を堆積させる方法も知られている<sup>8)-9)</sup>。

著者らは、UV レーザによる穴あけを行っている最中に一度直径 20 $\mu\text{m}$  程度の太く空いた穴が、さらにパルス照射することで直径 10 $\mu\text{m}$  程度まで細くなる現象を見いだした。これは、より深いところから蒸発した材料が内面に厚く再堆積したものである。本報では、この内面への再堆積現象を利用し、異なった材料を重ねてレーザーにより穴あけすることで、穴あけと同時に、上面の材料内面に下面の材料を堆積させ、穴あけと同時に内面への異種材料のコーティングを行う手法を検討した。最初にガラスを用いて内面の形状変化から、内面への再堆積量を評価し、その後、シリコンウエハと銅板を重ねて穴あけすることで、ウエハ内面の銅の成膜を行い導通を評価した。

## 2. 実験方法

光源には Nd: YVO<sub>4</sub> レーザの第 4 高調波を用い、1/4 波長板で円偏光にした後、焦点距離 30mm のレンズで集光した。レーザーエネルギーは 100 $\mu\text{J}$ 、繰り返し周波数は 10kHz とした。

穴の形状変化の観察にはガラスを用いた。耐熱性に優れたホウ珪酸ガラス (Pyrex® Corning 7740, Corning Inc.) 厚さ 10mm を用いた。光軸と直交する方向から観察できるようにカメラをセットし、反対側より照明光を導入することで、透過光像を機上にて観察した。

内面の成膜の評価には図 1 に示すように、ホウ珪酸ガラス (厚さ 0.5mm)、塩ビフィルム (厚さ 30 $\mu\text{m}$ 、銅とシリコンが接合するのを防ぐ)、シリコンウエハ (厚さ 100 $\mu\text{m}$ )、銅板 (厚さ 2mm) を重ね、ジグで固定した試料を用いた。

このシリコンウエハはクロスセクションポリッシュにより断面を出し、SEM-EDX により観察を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 ガラスへの穴あけ

レーザー光を 500 パルス照射し、カメラで撮影した後、さらに 500 パルス照射し、再度撮影することを繰り返し、穴の形状変化を撮影した。穴の先端付近での形状を評価するために、先端部分を拡大して撮影している。結果の一例を図 2 に示す。この図は透過光像であり、断面図とは異なり、穴の形状を正確に評価できる。図 2 は深さ 700 $\mu\text{m}$  近辺を観察している。図 2 より 1500 パルス照射後では、直径 20 $\mu\text{m}$  程度のほぼ一定の太さの穴が得られていることが分かる。先端部分 100 $\mu\text{m}$  程度の範囲では、テーパ状になり細くなっている。さらにこの穴の先端部分周囲には周囲とは色の違う変質部が観察される。この変質部は熱影響層やクラックなどと考えられる。さらに 500 パルス照射 (トータル 2000 パルス) することで、穴が深くなっていると同時に、すでに得られた穴の部分は細くなっている。図 2 (a), (b) の四角で囲んだ部分の拡大図を (c), (d) に示す。数  $\mu\text{m}$  程度細くなっており、矢印で示すように、(d) では (c) ですでにあつた変質部の内側にもう一層変質部が認められる。このこ

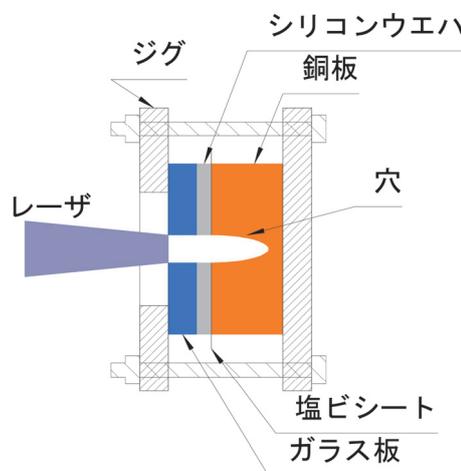


図 1 試料模式図

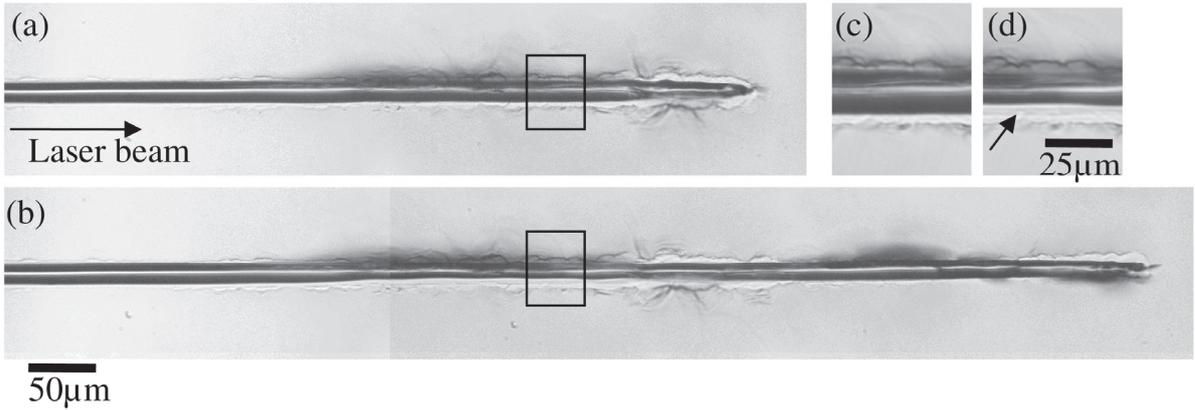


図2 ホウ珪酸ガラスにあけた穴 (a)1500パルス照射後, (b)さらに500パルス(トータル2000パルス, (c)(d)はそれぞれ(a)(b)の四角で囲った部分の拡大図

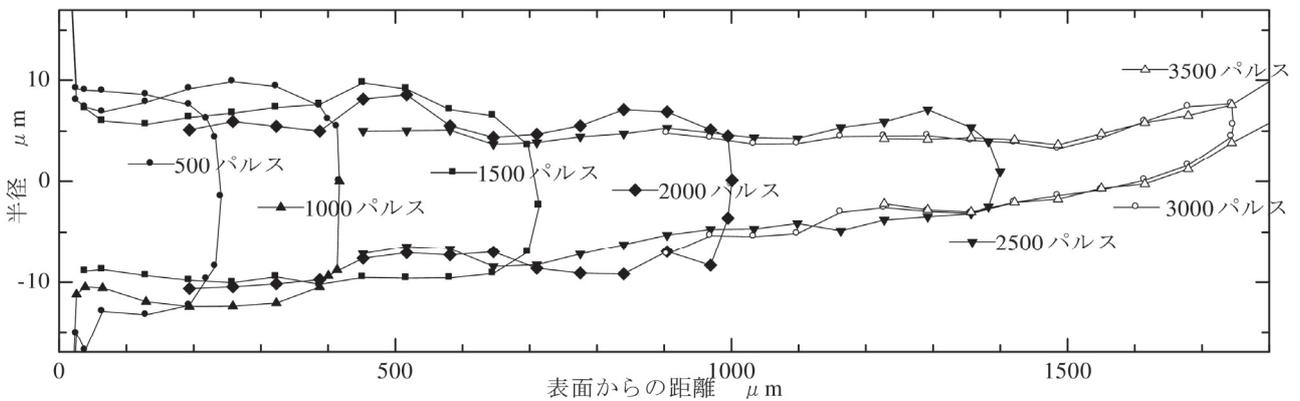


図3 穴形状の変化

とから,パルス照射を進めることで内面により深いところから蒸発したガラスが再堆積したものと考えられる.

500パルス照射毎の形状をプロットしたものを図3に示す.表面50 $\mu\text{m}$ から1400 $\mu\text{m}$ 程度の範囲では,一度太く空いた穴がさらにレーザを照射することで,細くなっていることが分かる.この太さの変化は直径で最大10ミクロン程度であり,表面50 $\mu\text{m}$ から深さ700 $\mu\text{m}$ 程度までは比較的大きく,700 $\mu\text{m}$ から1400 $\mu\text{m}$ の範囲では5ミクロン以下程度と比較的小さいことがわかる.深さ1400 $\mu\text{m}$ よりも深い位置では特に太さの変化は認められない.この穴の最終的な深さは1900 $\mu\text{m}$ 程度(3500パルス照射後)であった.これ以上のパルスの照射でも深くはならない.これは,穴が深くなることで,焦点から外れたり,細い穴内部を伝搬したりすることで,減衰したため,加工閾値を下回ったものだと考えられる.

3500パルス照射後に,最終的に得られた穴を図4に示す.直径15 $\mu\text{m}$ 以下の太さで1900 $\mu\text{m}$ 以上のアスペクト比100を超える深い穴が得られている.この深い穴が得られた原因については,熱の蓄積の影響<sup>10)</sup>が大きいと考えられる.先端部分が湾曲しているが,この湾曲の方向は一定せず,穴あけに応じて異なった方向に曲ることがあった.

このことから,この湾曲はビームの不均質によって出来るものではないと考えている.

### 3.2 内面への成膜

この内部への再堆積現象を利用して,内部に異なる物質の成膜に利用することを検討した.表面付近には再堆積層が認められず,比較的再堆積層が厚い深さ500 $\mu\text{m}$ 程度の付近を利用することを考え,厚さ500 $\mu\text{m}$ のガラスの下に,シリコン,その下に銅を重ねてジグで固定し,シリコンの内面に銅の成膜を試みた.シリコンと銅が付着することがあるため,塩ビのシートを挟んだ(図1).100 $\mu\text{J}$ ,10kHzで5000パルス照射した.その後,シリコンを取り出し,表面(レーザ入射側)裏面(レーザが抜けてくる側)の観察,切断研磨することでの断面の観察,導電性の確認などを行った.

SEM,EDXでの観察結果を図5に示す.図5(a),(d),(e),(f),(g)は反射電子像であるため,重い元素で構成される部分が白く観察される.図5(a)~(e)が断面図で左側からレーザが照射されている.(b),(c)は(a)のX線像でそれぞれCu-K $\alpha$ ,Si-K $\alpha$ 線像を示している.これらの図より直径15 $\mu\text{m}$ 程度の穴の内部に均一に銅が付着しており,下

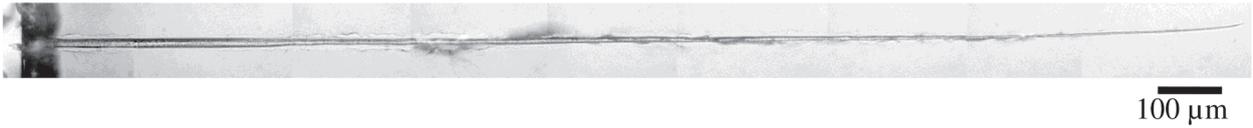


図4 3500 パルス照射後のガラスにあけた穴

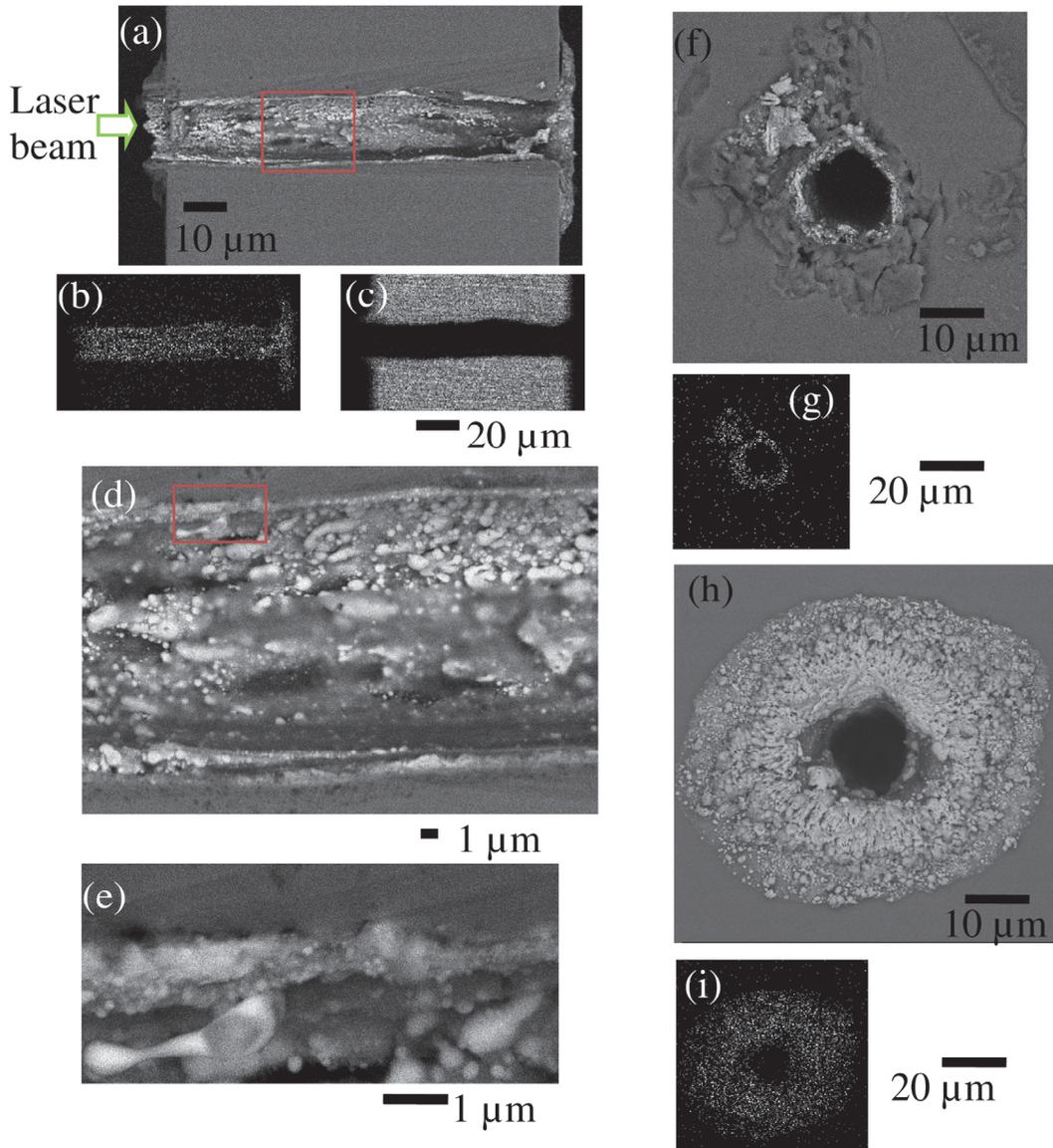


図5 シリコン穴内面のSEMおよびEDXマップ, (a)-(e):断面図, (f) (g)穴入り口, (h) (i)穴出口, (a), (d), (e), (f), (h): 反射電子像, (b), (g), (i): Cu-K $\alpha$  像, (c): Si-K $\alpha$  像: (d) (e)はそれぞれ(a) (d)中の四角く囲った部分の拡大図

地となるシリコンは穴の部分からは検出できない。図5(d), (e)はそれぞれ(a), (d)の四角で囲った部分の拡大図である。内部には1 $\mu$ m程度の銅の微粒子が付着していることが分かる。さらに穴の切断面付近の拡大図(e)からその厚さは数100nm程度であることが分かる。

ガラスに穴あけした場合には穴径が10 $\mu$ m程度であった

のに(図3)比べて、シリコンでの穴径は15 $\mu$ m程度と太い。この原因としては、物性などの違いと共に、再堆積層が数100nm程度とガラスの場合(数 $\mu$ m)に比べ薄かったためだと考えられる。シリコンや銅に対して図3と同様な形状測定も行えるとより詳細な評価が可能であるが、透過光像で見るとは困難であること、穴径が10 $\mu$ m程度と小

さいことから切断研磨することで、内面の形状変化を観察することも難しく、今後の課題である。

穴の上面、下面の反射電子像(f), (h)とCu-K $\alpha$ 線像(g), (i)を示す。穴の上面では直径15 $\mu\text{m}$ 程度の穴が観察され、穴の周囲には銅が観察できる。また穴の周囲には割れたような後が観察される。一方、穴の底面では直径15 $\mu\text{m}$ 程度の穴が観察され、その周囲に銅が直径60 $\mu\text{m}$ 程度の範囲に付着している。この面では塩ビを挟んであったため、塩ビが一部溶融して、そこに下から吹き出した銅が付着したものと考えられる。この銅は数 $\mu\text{m}$ 程度の粒子からなっている。内面でも直径1 $\mu\text{m}$ 程度の粒子が観察されるため、これらの粒子はレーザー照射によりさらに穴の深い部分の銅がアブレーションされ、穴の内部を移動中に冷却され、内面や下面に堆積したものだと考えられる。上面での割れたような跡は上面にのみ観察でき、内面などでは観察されないことから、穴あけ時に出来たのではなく、ガラスを剥離する際に生じたものと考えられる。

さらに、導電性を評価するため、ゴムシート上に、銅箔、さらに試料を載せた。その上から、穴の部分にタングステンプローブを当てて、銅箔とプローブ間の抵抗を評価した。その結果、100 $\Omega$ 程度であり、導電性を有していることを確認した。シリコン自体では2M $\Omega$ を以上であった。大気中で照射していることもあり、酸化の影響による膜自体の抵抗の変化だけでなく、穴の入り口、出口部分での接触抵抗なども考慮する必要があり、抵抗の妥当性などについての検討は今後の課題である。

#### 4. まとめ

異なる材料を重ね、まとめて穴あけすることで、下にある材料を上部の穴内面に付着する方法を提案し、実際に直径は15 $\mu\text{m}$ 程度の穴あけをシリコンに行い、その内部に銅を付着させ、導電性を確認した。表面での割れや抵抗が十分に高くないなどの問題はあるが、直径15 $\mu\text{m}$ 以下の穴あけと同時に、内面への成膜を実現しており、貫通配線などとしての応用可能性は高いと考えられる。さらに重ねる材料を様々なに代えることで、導電性だけでなく、様々な物質を再堆積できると考えられ、重ねる材料の種類を増やすことでの多層膜の形成も期待できる。

#### 謝 辞

本研究の実施に際し、公益財団法人天田財団より一般研究開発助成 (AF-2013203)を賜りました。厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) V. F. Pavlidis and E. G. Friedman, Three-dimensional Integrated Circuit Design (Morgan Kaufmann, 2008).
- 2) V. Sukumaran, Q. Chen, F. Liu, N. Kumbhat, T. Bandyopadhyay, H. Chan, S. Min, C. Nopper, V. Sundaram and R. Tummala, 2010 Electron. Components Technol. Conf., 557 (2010).
- 3) H. Nakagawa, K. Ogawa, A. Kihara and T. Hirogaki: Improvement of micro-drilled hole quality for printed wiring boards, J. Mater. Process. Technol. 191, 1-3 (2007) 293.
- 4) I. Koiwa, Y. Wakuda, T. Suzuki, T. Tamura, A. Fujisaki, K. Koiwa, T. Yamada, S. Ando and A. Matsuno, 2009 Electron. Components Technol. Conf., 879 (2009).
- 5) A. Kestenbaum, J. F. D'Amico, B. J. Blumenstock and M. A. Deangelo: Laser drilling of microvias in epoxy-glass printed circuit boards, IEEE Trans. Components Hybrids Manuf. Technol., 13, 4 (1990) 1055.
- 6) A. Luft, U. Franz, A. Emsermann and J. Kaspar: A Study of Thermal and Mechanical Effects on Materials Induced by Pulsed Laser Drilling, Appl. Phys. A 63, 2 (1996) 93.
- 7) S. Döring, T. Ullsperger, F. Heisler, S. Richter, A. Tünnermann and S. Nolte: Hole Formation Process in Ultrashort Pulse Laser Percussion Drilling, Physics Procedia 41, 0 (2013) 431.
- 8) N. Morita, T. Watanabe and Y. Yoshida: Direct formation of conductor films by laser sublimating of ceramics, Appl. Phys. Lett. 54, 20 (1989) 1974.
- 9) J. K. Lumpp and S. D. Allen: Excimer laser machining and metallization of vias in aluminum nitride, IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology Part B 20, 3 (1997) 241.
- 10) Hirofumi Hidai, Souta Matsusaka, Chiba Akira, Noboru Morita: Heat accumulation in microdrilled glass from ultraviolet laser ablation, Appl. Phys. A, 120, 1 (2015) 357-367.