

半導体のレーザー溶接

デビッド・グロホ、ポル・ソペナ

赤外 (IR) 領域の光を照射する小さなナノ秒ファイバレーザー源を利用した、新しいソリューションを紹介する。この画期的な方法は、レーザー溶接技術の応用範囲をさらに拡大する可能性がある。

高集束の超短パルスを使用することにより、ポリマー、誘電体、さらにはセラミックといった、ほぼすべての種類の透過材料に対する微細溶接を、確実に達成することができる。この方法では、接合する2つの材料を、互いに接触させて配置する。上の材料はレーザー照射を透過する必要がある。それによってビームは、上の材料を貫通して接触面で集束することができる。ビームを吸収すると、両方の材料が溶融して結合し、その後再凝固することで、上下の部品が接合される。

これは、主要な積層造形 (AM) プロセスとなっており、光学機械部品のアセンブリから、温度に敏感な部品 (電子部品など) 用の高度な封止技術に至る

まで、多くの技術的及び科学的分野で適用されている。しかし意外なことに、この方法が適用できない、重要な例外が存在する。半導体材料は、赤外 (IR) 領域の光を透過するにもかかわらず、この標準的なレーザー加工方法を使用して確実に接合することができない。

古くから存在するこの問題の原因が、狭バンドギャップ材料における伝播の強い非線形性にあり、表面よりも下にビームを集束させると、デフォーカスが生じて焦点前にプラズマが形成されることは、広く知られている。半導体内部の超高速IR光の場合は、これらの現象が、焦点における効率的なエネルギー堆積の妨げとなる。これによって、あらゆる種類の材料改変が妨

げられ、その結果、接合する2つの材料の間の接触面における、溶融とそれに続く再凝固が妨げられる。

この問題に対処するために、最近の研究では、パルス列、ハイパーフォーカス手法、または、より長いパルスを使うことによる非線形性の低減に基づく、複雑な補償方法が提案されている。最後の方法では、ピコ秒パルスを使用することにより、超高速レーザーによるシリコンと金属の溶接が可能であることが示されている。そこでは、下の材料が金属で、それによってエネルギー吸収が改善されていた。しかし、レーザー溶接の枠組みの中で、半導体同士の溶接は、この種の最適化の適用対象外のままとまっている。

その原因は、フランス国立科学研究センター (French National Center for Scientific Research) とエクス=マルセイユ大 (Aix-Marseille University) の間の共同研究施設であるLP3における筆者らの研究で最近明らかになった、2つめの重要な物理的制約にあった。筆者らは、高屈折率の半導体の間の接触が不完全であると、2つの材料の間の接触面に空隙ができることを発見した (図1)。これが接触面のエネルギー密度を引き下げる、共振光学キャビティとして作用する。偶然にもこれは、1世紀以上前 (1899年) に筆者らと同じ都市で発明された有名なファブリ・ペロー (Fabry-Perot) 干渉計に似た、干渉計構成において対処が必要となる状

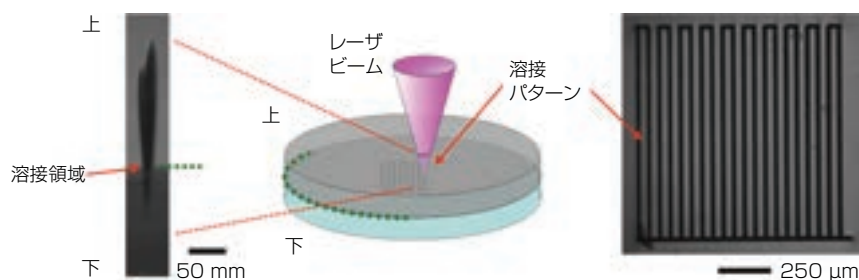


図1 上下の材料の間の接触面にレーザーの焦点を合わせて、ラスタ走査して大きな領域を溶接する実験の概略図。溶接スポットの側面図の赤外 (IR) 画像 (左) には、接触面を横断する形で生成される改変の様子が示されており、溶接領域のIR画像 (右) には、蛇行形状の溶接パターンが示されている

況と一致する⁽¹⁾。

シリコン同士のレーザー溶接

この新しい知識に基づき、最初の実験では、両方の制約を回避する加工構成によって、シリコン同士のレーザー溶接を行った。この実験では、超短パルスの代わりにナノ秒パルスを使用することによって伝播の非線形性を低減する一方で、2つの半導体材料をできるだけ近づけて光学的に接触させることで空隙を回避した。これにより、マイクロメートルから数ミリメートルにわたる均質な領域の溶接を簡単に行うことができ、30MPaという非常に高い接合強度が得られた。

興味深いことに、この接合性能は、最初に示されたシリコンと金属の溶接よりも既に高く、高度な分子的なウエハ接合方法で得られる標準的な値に近い。

複数材料からなる構造の接合

この結果を受けて、この方法をヒ化ガリウム(GaAs)に適用した。これは、他の半導体を溶接する能力だけでなく、さまざまな複数材料構造においてそれらを接合できることを示すものである。これらの他のケースについても、非常に高い性能が示され、試験したすべてのケースで、平均接合強度は約15MPaだった(図2)。これは、同種及び異種の半導体や、さらには、半導体を上の材料とした複雑な微細システムのアセンブリ構造に対する、レーザー溶接の可能性を示している。

興味深いことに、レーザー材料加工の一般的なトレンドは、フェムト秒領域に至るまでのますます短いパルスを使用する方向に進行しているにもかかわらず、半導体を適切にレーザー溶接することを追求する中で筆者らは、一歩後退してナノ秒パルスを使用しなければ

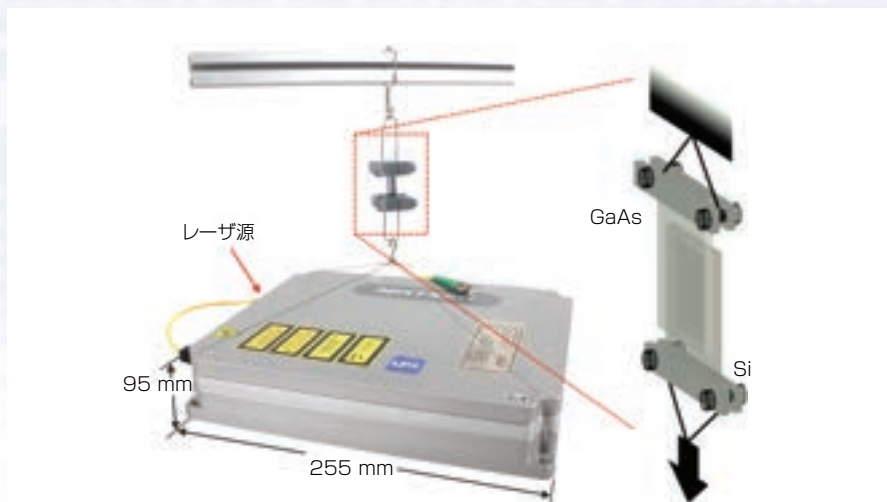


図2 溶接部の接合強度とレーザー加工性能を示すために、溶接に使用したレーザー源を、異種半導体の間の溶接部から吊り下げることができる

ならなかった。注目すべき点は、すべての実験が、コンパクトで費用対効果の高い、商用のファイバレーザー源を使用して行われていることである。これは、産業用高出力レーザーを使用した大きなウエハの加工に、このプロセスを拡張できる可能性を示唆している。また、マイクロエレクトロニクスの産業分野の生産ラインに、この方法を簡単に組み込める可能性がある。

複雑な構造の結合

半導体に適用可能な他の積層造形技術(分子的なウエハ接合など)にはない、このレーザーソリューション独自のメリットは、他の方法では不可能な、複雑な構造や複数の半導体からなる構造が、結合できる可能性があることである。

レーザービームを正確に誘導することができるため、ウエハ全体や大きな部品を、加工せずにそのまま接合できる。対象領域に選択的にビームを照射することにより、複雑な形状の小さな部品も、高い精度で簡単に溶接することができる。

これは、エレクトロニクス、中赤外フォトニクス、MEMS(microelectromechanical system: 微小電気機械システム)の新しい製造方法の扉を開くものである。また、このような柔軟性の高いアセンブリプロセスは、要件の厳しい半導体技術において持続可能な冷却手段を提供する、エレクトロニクスとマイクロ流体力学のコデザインシステムなど、新たに出現するハイブリッドチップのコンセプトに対しても、可能性を秘めている。

参考文献

(1) See www.univ-amu.fr/index.php/en/node/6563.

著者紹介

デビッド・グロホ(David Grojo)は、フランス国立科学研究センター(French National Center for Scientific Research)とエクス=マルセイユ大(Aix-Marseille University)の間の共同研究施設であるLP3の研究ディレクター、ポル・ソペナ(Pol Sopena)は、同博士研究員。
e-mail: david.grojo@univ-amu.fr URL: <https://lp3.fr/en/lp3-2>

ILSI