

超高速レーザーを用いた医療マイクロシステムの3Dプリンティング

エリック・モテイ、イヴス・ベルアード

超高速レーザーは増加するマイクロシステム製造要求に応えることができ、ガラスや溶融シリカから光学的に豊かなバイオセンサを造ることが可能になる。

生命科学ではマイクロシステムの利用が拡大しており、アプリケーションは基礎研究から診断、治療まで幅広い。超高速レーザーにより、従来のマイクロシステム作製に、根本的に異なる代替アプローチが可能になっている。その際、ますます強まるより微小構造（一般には数ミリメートルオーダー）の要求にも超高速レーザーは応えられる。ここでは、サブミクロンの機構が能動素子に集積されており、また、機械的、電気的、流体的、光学的コンポーネントの同時集積を必要とする多機能性も持っている。

多様な材料や機能を組み合わせたり

組み立てたりして1つのデバイスを作るのではなく、超高速レーザーは1つの材料を、その特性を局所的に変えながら1つのマイクロシステムに変えていく。基板、構成要素、機能あるいはデバイスの区別がなくなり、コストや製造の複雑さが大幅に低減される。

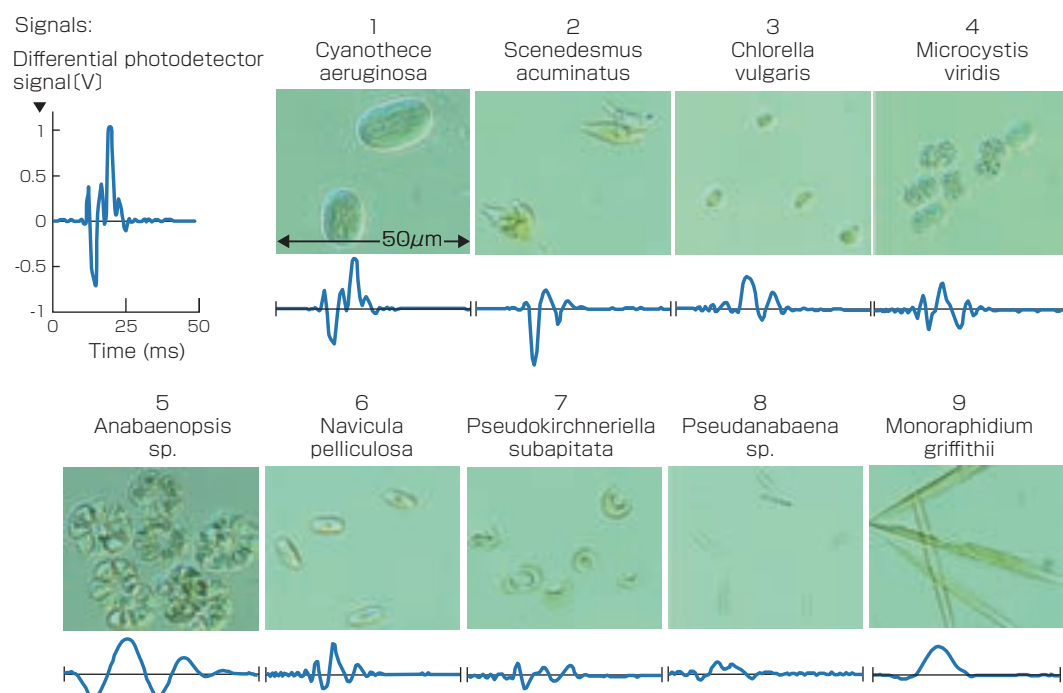
溶融シリカ

超高速レーザーで作製されたマイクロデバイスは、ガラスまたはシリカ（石英）を主要コンポーネントとして使い、従来のマイクロシステムのようなシリコンは使わない。光学機能向けの完全な材料、溶融シリカは、直感的には機

械的機能の候補となりにくい。しかし、溶融シリカは、その表面特性が十分に制御できれば、マイクロスケールでは優れた機械特性を持っている。

溶融シリカマイクロデバイスの製造は2段階工程であり、原理的には写真に少し似ている。最初の段階では、材料構造に目立った変化が出ない程度に低い出力のレーザーをバルクシリカに露光するが、溶融シリカの局部緻密化を誘導するには十分である。

第2段階では、基板を低濃度のフッ化水素酸溶液でエッチングする。エッチングレートは材料の高密度箇所では非常に高く、レーザー露光量で選択的エッチングすることになる。このレーザー露光領域のエッチング速度は一般に、元のままの材料よりも100倍速い。



バイオセンサは、藻のそれぞれの種類に対して異なる信号を生成する。



図1 超高速ファイバレーザ(a)により、フェムトプリンター(b)を用いてマイクロシステムの製造が可能になる。

さらに、レーザ露光領域の形状を注意深くコントロールすることで多くの多様な機械的、流体力学的コンポーネントを簡単に設計、製造できる。

このレーザは、材料を除去するのではなく、材料の特性を変えるので、レーザアブレーションやマイクロマシニング工程で通常必要とされるものと異なる特殊要件がある。その工程は、アブレーションしきい値よりも低いところで行われ、パルスエネルギーは一般に数10nJ~1μJである。パルス繰り返しレートは数100kHz~数MHz。1MHzよりも高いレーザでは、熔融シリカにおける累積熱吸収が露光プロセスに影響を与える可能性がある。最後に、パルス幅は150~500fsとなっている。

フェムトプリンター

シリカに必要なレーザ露光が低エネルギーであるので、超コンパクト、空冷式超高速レーザの利用が可能になる。これは3Dプリンティングシステムに統合できる。EUが支援するFemtoPrintリサーチプロジェクト(www.femtoprint.eu)は、そのようなプリンターを開発するために先進的な学術研究所と産業分野の企業をまとめている。

靴箱サイズの超高速レーザ(図1a)、高度なビームハンドリングおよび集束、

使いやすいソフトウェアで構成されたフェムトプリンター(図1b)は、ガラスにナノスケールで3次元(3D)パターンを生成できる。このリサーチプロジェクトに続いて、3Dマイクロプリンターを商用化する目的でスタートアップカンパニーであるフェムトプリント(Femto Print)社が設立された。

フェムトプリンターは、単一のガラスまたはシリカ基板に対して多機能操作を行う独自の能力があるので、マイクロメカニカルコンポーネント、流体チャネル、光導波路、センサなどのデバイスに複数の重要機能を作り込むことができる。

フレキシャ、チャネル、導波路

フレキシャは、機械的な動きを正確に導くための精密工学、微細工学で一般に使われる機械素子となる。弾性的に変形し、従来のマルチパートコンポーネントよりも、摩擦、摩耗、ヒステレシスに対して、遙かに耐性が高い。マクロスケールではガラスや熔融シリカは脆いが、最大3ギガパスカル(GPa)のフレキシャが実証されている(図2a)。

フレキシャは、さらに複雑なマイク

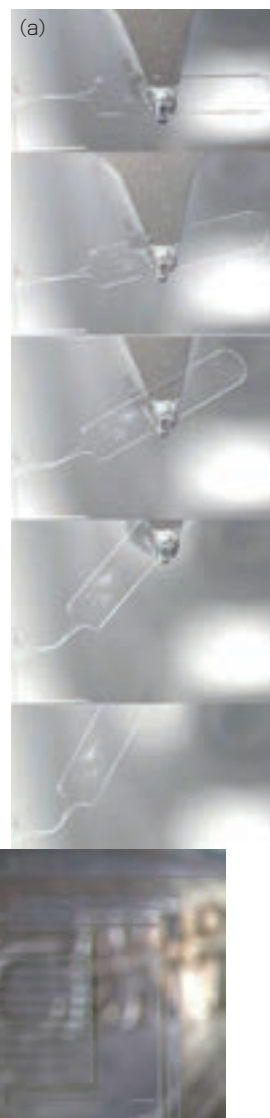


図2 フェムトプリンターは、(a)微細フレキシャや(b)マイクロメカニカルアクチュエータなどのガラスや熔融シリカ構造を造ることができる。

ロメカニカルコンポーネントの重要構成要素である。例えば、ガラスに刻み込まれ、透明ITO電極で被覆したコアレイによって完全に透明なマイクロアクチュエータが可能になる。これにより、不透明な構造によって妨げられない直接的な光センシングと機械的顕微操作の組み合わせが実現される。

高アスペクト比、任意の形状の流体チャネルの作製もこの工程の重要な特徴になる(図2b)。最初の3Dレーザ露

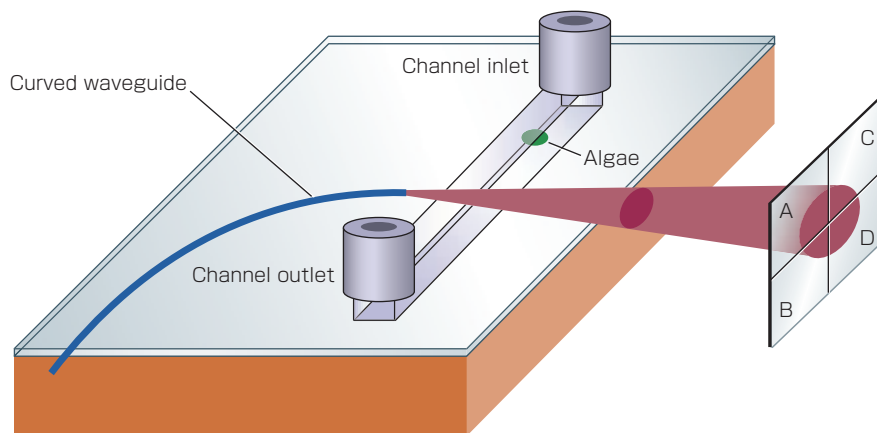


図3 藻の高速スクリーニング、リアルタイムモニタリング、初期分類用に設計されたバイオセンサには、流体工学機能と光学機能の両方が組み込まれている。これは、フェムトプリンターを用いて製造した。

光に柔軟性があるので、表面にチャンネルを描くか、あるいは立体的なトンネルを基板に組み込むかの選択が可能となる。達成可能なアスペクト比には、事実上限界がない。直径 $10\mu\text{m}$ でミリメートル長の構造は、ごく普通に達成できる。これらのチャンネルも微小流体システムにとっては重要である。

最後に、レーザー露光によって基板の屈折率が変わり、材料を追加することなく基板内に光導波路を作製できる。これらは、光センサに組み込み可能である。3Dプリンティング工程で湾曲導波路の作製もできる。

成果:リアルタイム水質分析

アイントホーフェン工科大の研究者たちは、この超高速レーザーベースの工程で作製した完全なマイクロシステムの例を示した。マイクロシステムはバイオチップからなり、藻の高速スクリーニング、リアルタイムモニタリング、初期分類用に設計されている(図3)。藻の種を迅速に特定することは、水質評価と有害事象のモニタにとって有益な手段となる。例えば、富栄養化、植物プランクトン「ブルーム」は、窒素やリン酸塩などの栄養物の増加に対応

したものである。

現在、水試料中の藻の内容物を特定するには試料を研究室に送り、訓練された研究者が特殊環境の中で特定の試験を行う。超高速レーザーを使って作製した微小流体デバイスは、微生物を現場で検出しモニタするという付加価値をもつ安価な代替となる。この機能により、脅威を迅速に評価し、反応時間が速くなるだけでなく、計測プロセスでの技術レベルを下げ、さらにコストも下げることができるようになる。このようなデバイスはコンパクトで持ち運び可能であり、リアルタイム解析ができる。超高速レーザー技術だけが、このような小型、多機能デバイスを製造することができる。

そのセンサには、流体学機能と光学機能の両方が内蔵されている。断面 $100\times 100\mu\text{m}$ の方形チャンネルが、露光とエッチングによりガラスに作製される。チャンネル面に対して垂直に、 90° 曲り導波路を実現する。導波路が曲がっ

ているので、結合されない寄生光が除去できる。曲げ半径の 18mm はレーザー誘導屈折率変化によって決まる。

水試料が流体チャンネル内に流れ込む。ファイバを接続したレーザー光源を光導波路に入れ、チャンネルの一部に光を当てる。伝送された光は次に、4分割フォトディテクタで解析される。細胞または粒子がチャンネルに流れ込むと、そのフォトディテクタ上で影となる。4個のフォトディテクタからの合成信号は、チャンネル(Frontis参照)を通過する粒子の形状特性となる。次にソフトウェア処理により、その信号と特定の藻の種類とが関連づけられ、特定される。実験結果から、同じチャンネルに流れ込んだ藻の異なる9種類が、85%の精度で特定可能であることが実証された。

センサのさらなる開発は可能である。他の導波路を追加することで、流量や藻の形状についての追加データなど、定量的な情報がさらに多く得られる可能性がある。デバイスに他の機能(フロー処理、ビーム検出)を集積すると、デバイスのサイズがさらに小型化し、柔軟性が高まる。

将来の要求に応える

マイクロシステムは、生命科学応用に向けて、より高度になり、多機能となることが求められているので、超高速レーザー技術はこれらの要求に応えるために強化を進めている。目的は、任意の形状のチャンネル(基板に集積された表面形状と立体トンネル)が造れ、単一の基板で実質的にアスペクト比の制限をなくすことである。

著者紹介

エリック・モテイは、アンプリチュードシステムズの社長/CEO。

e-mail: emottay@amplitude-systemes.com. URL: www.amplitude-systemes.com

イヴス・ベルアードPh.D.は、アイントホーフェン工科大機械工学部、マイクロ/ナノスケール光学准教授。URL: www.tue.nl/en