

論文内容の要旨

博士論文題目

Development of ultra-thin glass flow velocity sensor fabricated by femtosecond laser processing

(フェムト秒レーザー加工による超薄型ガラス製フローセンサーの開発)

氏 名 Hao Yansheng

(論文内容の要旨)

マイクロ流体デバイス分野では、デバイスの本来の機能を損なわずに流路内の流速を精密に測定することが重要な課題となっている。既存手法は流路内での熱の伝達拡散や、MEMS 技術で作成した複雑な構造体の変形から、流速を求めている。しかし、これらは試料である生体や化学物質への熱の影響や、マイクロスケールの流れの乱れによるデバイス機能への影響が問題となる。また、微細な粒子をマイクロ流路内に導入し、流路中を流れる粒子の流速分布を画像的な手法で計算する方法もあるが、マイクロデバイス本体に比べてシステムが複雑で巨大な上、粒子の流路への吸着や試料汚染の危険性が排除できない。そこで、マイクロ流体デバイスに適した新しい流速計測技術の開発が期待されている。本論文では、これらの問題を回避するため、超薄板ガラス製のカンチレバー型のフローセンサーを流路底面に導入し、センサーの微細な変位をレーザー反射法で検出して流速を計測する方法を提案し、流体力学的数値シミュレーションと実験で実証した。

第1章ではマイクロ流体デバイス技術の背景と応用、流路内での流速測定的重要性、これまでの流速測定技術とその欠点、及び既存の技術的な課題に関して概説した。

第2章では、数値シミュレーションを用いた本提案手法の原理の検証と、提案した超薄型ガラス製フローセンサーの寸法の最適化と設計について述べた。さらに最適化設計に基づき、マイクロ流路内に超薄板ガラス製底面にフローセンサーを作製するため、複数の微細加工方法を検討し、フェムト秒レーザー加工技術が適していることを示した。最後に、超薄型ガラス製フローセンサーを用いた計測システムの構成と構築について述べた。

第3章では従来の流速計測方法と比較しながら、超薄型ガラス製フローセンサーを用いた計測システムのキャリブレーション方法とその結果に関して述べた。第4章では超薄型ガラス製フローセンサーの性能実証した内容を述べた。さらに本章ではマイクロ流路中の液体の流速測定、センサーの耐酸性、耐薬性、寸法の影響（長さ、幅、厚み）、周波数特性を調査した結果を記載した。また、液体のみならずマイクロ流路中を流れる気体の測定も可能であることを示した。第5章では提案したセンサーのマルチ化により、流路中での多点流速計測を実現できることを述べた。

第6章では、本論文の研究成果と将来展望を総括した。

(論文審査結果の要旨)

本研究は、マイクロ流体デバイスの本来の機能を損なわずに流路内の多点流速を精密に測定することを実現したものである。流路内の流れを乱れずに、簡便で非侵襲的な多点流速計測センサーの原理検証、設計と開発を行い、下記の成果を得た。

既存手法は流路内での熱の伝達拡散や、MEMS 技術で作製した複雑な構造体の変形、流路内に導入された微粒子の速度分析から流速を計測するが、本研究は前記の方法と違い、新たな流速計測用のフローセンサーとその原理を提案し、流体力学的数値シミュレーションと実験でそれを実証した。さらに、提案した超薄型ガラス製フローセンサーの寸法の設計を最適化した。

前記の数値シミュレーション分析で得られた最適なセンサー寸法の設計案に基づき、マイクロ流路内に超薄板ガラス製底面にフローセンサーを作製するため、複数の微細加工方法を検討し、フェムト秒レーザー加工技術が適していることを示した。さらに、倒立型顕微鏡、半導体レーザーと超薄型ガラス製フローセンサーを用いた反射型計測システムの設計と構築を行った。

従来の流速計測方法と比較しながら、超薄型ガラス製フローセンサーを用いた計測システムのキャリブレーション方法を確立し、一定の流速条件 (0.067m/s and 0.804m/s) で安定した流速計測が可能であることを示した。さらに、マイクロ流路中を流れる液体と気体の流速測定、センサーの耐薬性 (アセトン、高濃度トルエン液)、寸法の影響 (長さ、幅、厚み)、感度 (409 mV/(m/s))、周波数特性を細かく調査し、明らかにした。また、流路中に、提案したセンサーを同列に複数配置することにより、流路中での多点流速計測が実現できた。これによって、マイクロ流路中にある流速不均一が計測可能になり、慣性力を用いるマイクロ流体デバイスの応用 (配列・分取など) に大きな役を立つと期待できる。

上記のとおり、本論文には、マイクロ流体デバイスの流路中の流速を、マイクロスケールで流体の流れを乱れず、簡便で非侵襲的な超薄型ガラス製フローセンサーの開発に成功した結果が示されている。本システムを利用することによって、マイクロ流体デバイスでの精密な流速制御へ繋がることが見込まれ、

ナノマイクロ工学分野から細胞生物学分野までの幅広い応用展開が期待され、その成果は、学術的に新しい知見を見出していると判断され、審査委員一同は、本論文が博士（工学）の学位論文として価値あるものと認めた。