

論文内容の要旨

博士論文題目 CMOS 技術を用いたマイクロ化学デバイスに関する研究
氏 名 皆川 亨介

(論文内容の要旨)

近年、バイオ応用を目指したマイクロ化学システムとして、センサやアクチュエータを集積化した μ TAS (Total Analysis System) や bio-MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の研究が進んでいる。本研究では、複数の計測機能や付加回路の集積化が容易である CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 技術を用い、流体を制御・計測することができるマイクロ化学システムの実現を目的とした。各種計測機能を備えた CMOS センサをマイクロ化学システムでは、局所的な反応状況の計測が *in situ* で可能となり、反応条件の制御や反応効率の向上が期待できる。本研究では、マイクロ化学システムにおける重要な計測機能の一つである、偏光計測が可能な CMOS センサを搭載するマイクロシステムの構築を提案した。CMOS センサは 0.35 μ m 標準 CMOS プロセスを用いて試作されたものである。本研究では特に、CMOS センサを搭載するマイクロ流路の形成と、マイクロ流路内の不斉分子による旋光の *in situ* 計測の実証を行った。

Si ウェハに、DRIE (Deep Reactive Ion Etching) により深さ 500 μ m のマイクロ流路とマイクロチャネル形状を作製、CMOS センサ上に積層し、CMOS 偏光計測センサ集積型マイクロ流路デバイスを試作した。積層したマイクロ流路下面では、CMOS センサの表面が直接測定対象の液体に接する。実際に液体を流し、CMOS センサが正常に動作することを確認した。試作したデバイスを用いて、マイクロチャネル内における不斉分子の旋光度測定を行った。試料として異なる濃度のスクロース溶液を用いて評価し、0.05 deg の精度を得た。また、マイクロ流体内の経時的な不斉分子濃度変化を検出するのに成功した。

2 次元的なマイクロリザーバ構造から、チップの垂直方向に各種の化学物質を吐出するマイクロ化学システムの実現のために、アドレッシング機能を搭載可能な CMOS 集積回路を用いた新しいデバイス形態を考案した。CMOS デバイスの動作電圧(5.0 V)内で駆動するマイクロポンプを考案し、任意の領域への薬剤投与が可能となる選択回路を搭載する CMOS 集積回路の設計、およびこれを用いた 2 次元アレイ型化学物質吐出デバイスの開発を行った。

CMOS 集積回路として、0.35 μ m 標準 CMOS プロセスによる 2 次元電解セルチップを設計した。選択可能な 4 $\times$ 4 の各セル(セルサイズ 240 μ m $\times$ 240 μ m)には 2 つの金電極を形成した。このセル構造上に微小液滴吐出のためのマイクロポンプ機構を Si 微細加工技術により試作した。試作したデバイスは、シリコン膜を挟んだ 2 室構造であり、リザーバーセルに対象溶液(薬液)、電解セル(CMOS チップ側)に電解質液を保持する。電解セル内に形成した金バンプ電極から電流を注入し、ガス(水素・酸素)を発生・膨張させると、シリコン膜の変形が生じてリザーバーセル内の薬液が吐出される。CMOS 回路によって選択的に任意の電極から電荷を注入し、任意のリザーバーセルからの薬剤吐出が可能となる。定電流 3 μ A での動作実験を行った。ガス発生によって生じるシリコン膜の変位を走査型レーザー顕微鏡によって測定し、最大変位量 80 μ m (駆動時間 50 s)において確認した。また、電圧範囲 5.0 V 以下で駆動可能であることを確認した。薬剤吐出機構を検証するためにマイクロ流体の吐出量を計測し、注入電流(電荷量)に比例した吐出量領域があることを確認した。この結果から、注入電荷量を調整することによりマイクロ流体吐出の制御が可能であると考えられる。

以上のように、CMOS 技術を用いたマイクロ化学デバイスの実現に向けたデバイス構造と機能を提案し、試作・実証を行った。マイクロ流体内の不斉分子の計測とマイクロ流体の吐出デバイス機能実証に成功した。

(論文審査結果の要旨)

近年、バイオ応用を目指したマイクロ化学システムとして、センサやアクチュエータを集積化した μ TAS (Total Analysis System) や bio-MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の研究が進んでいる。本研究では、複数の計測機能や付加回路の集積化が容易である CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 技術を用い、流体を制御・計測することができるマイクロ化学システムの実現を目的とした。各種計測機能を備えた CMOS センサを用いたマイクロ化学システムでは、局所的な反応状況の計測が *in situ* で可能となり、反応条件の制御や反応効率の向上が期待できる。本研究では、マイクロ化学システムにおける重要な計測機能の一つである、偏光計測が可能な CMOS センサを搭載するマイクロシステムの構築を提案した。CMOS センサは 0.35 μ m 標準 CMOS プロセスを用いて試作されたものである。本研究では特に、CMOS センサを搭載するマイクロ流路の形成と、マイクロ流路内の不斉分子による旋光の *in situ* 計測の実証を行った。

Si ウェハに、DRIE (Deep Reactive Ion Etching) により深さ 500 μ m のマイクロ流路とマイクロチャネル形状を作製、CMOS センサ上に積層し、CMOS 偏光計測センサ集積型マイクロ流路デバイスを試作した。積層したマイクロ流路下面では、CMOS センサの表面が直接測定対象の液体に接する。実際に液体を流し、CMOS センサが正常に動作することを確認した。試作したデバイスを用いて、マイクロチャネル内における不斉分子の旋光度測定を行った。試料として異なる濃度のスクロース溶液を用いて評価し、0.05 deg の精度を得た。また、マイクロ流体内の経時的な不斉分子濃度変化を検出するのに成功した。

2 次元的なマイクロリザーバ構造から、チップの垂直方向に各種の化学物質を吐出するマイクロ化学システムの実現のために、アドレッシング機能を搭載可能な CMOS 集積回路を用いた新しいデバイス形態を考案した。CMOS デバイスの動作電圧(5.0 V)内で駆動するマイクロポンプを考案し、任意の領域への薬剤投与が可能となる選択回路を搭載する CMOS 集積回路の設計、およびこれを用いた 2 次元アレイ型化学物質吐出デバイスの開発を行った。

CMOS 集積回路として、0.35 μ m 標準 CMOS プロセスによる 2 次元電解セルチップを設計した。選択可能な 4×4 の各セル(セルサイズ 240 μ m×240 μ m)には 2 つの金電極を形成した。このセル構造上に微小液滴吐出のためのマイクロポンプ機構を Si 微細加工技術により試作した。試作したデバイスは、シリコン膜を挟んだ 2 室構造であり、リザーバーセルに対象溶液(薬液)、電解セル(CMOS チップ側)に電解質液を保持する。電解セル内に形成した金バンプ電極から電流を注入し、ガス(水素・酸素)を発生・膨張させると、シリコン膜の変形が生じてリザーバーセル内の薬液が吐出される。CMOS 回路によって選択的に任意の電極から電荷を注入し、任意のリザーバーセルからの薬剤吐出が可能となる。定電流 3 μ A での動作実験を行った。ガス発生によって生じるシリコン膜の変位を走査型レーザー顕微鏡によって測定し、最大変位量 80 μ m (駆動時間 50 s)を確認した。また、電圧範囲 5.0 V 以下で駆動可能であることを確認した。薬剤吐出機構を検証するためにマイクロ流体の吐出量を計測し、注入電流(電荷量)に比例した吐出量領域があることを確認した。この結果から、注入電荷量を調整することによりマイクロ流体吐出の制御が可能であると考えられる。

以上のように、本論文では、CMOS 技術を用いたマイクロ化学デバイスの実現に向けたデバイス構造と機能を提案し、試作・実証を行い、マイクロ流体内の不斉分子の計測とマイクロ流体の吐出デバイス機能実証に成功した。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。