JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	次世代高密度バイオチップのためのPZTアクチュエータアレイの開発
Author(s)	志村，礼司郎
Citation	
Issue Date	2018-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/15329
Rights	
Description	Supervisor:高村　禅，マテリアルサイエンス研究科，博士

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

氏　　名	志村　礼司郎
学　位　の　種　類	博士(マテリアルサイエンス)
学　位　記　番　号	博材第 446 号
学位授与年月日	平成 30 年 3 月 23 日
論　文　題　目	次世代高密度バイオチップのための PZT アクチュエータアレイの開発
論文審査委員	主査　高　村　　禪　　北陸先端科学技術大学院大学　　教授
	下　田　　達　也　　同　　教授
	小矢野　　幹　夫　　同　　教授
	平　塚　　祐　一　　同　　准教授
	舟　窪　　浩　　東京工業大学　　教授

論文の内容の要旨

研究の背景および目的

近年、遺伝子診断や再生医療等の先端医療の発展は目覚ましく、様々なアプローチが研究・提案されている。先端医療の発展には生体内の構造や科学現象、細胞間の信号伝達機構等の解明が必要不可欠であり、これら生命の仕組みを解明する研究が急がれている。その中でも 1 細胞解析の研究分野は、生体組織の最小単位である 1 細胞の mRNA や代謝物を詳細に解析するため、その生体組織内における細胞間の複雑なネットワークを介して発生する生命現象を解析できると期待されている[1, 2]。また、微量な物質を分取・検出する技術に長けた微小流体デバイスや MEMS を用いた 1 細胞解析の研究が活発に行われている[2]。ここで、研究対象の 1 細胞が生体組織内のどの位置に存在するかを厳密に知りつつ、その細胞から mRNA や代謝物を直接入手し分析することは、複数の細胞のネットワークを介して発現する生命現象を解析するのに大いに役立つものであると考えられる。しかし、そのような手法は確立されていない。そこで本研究グループではマイクロマシンの技術を用いて、生体組織中の各細胞の位置情報と共にその中の 1 細胞に内包される mRNA や蛋白質を分析することを可能にする、次世代高密度バイオチップの開発を目指している。次世代高密度バイオチップは 1 細胞を接触させ、ポンプの陰圧により細胞膜を破壊して mRNA や蛋白質を抽出するものである。マイク

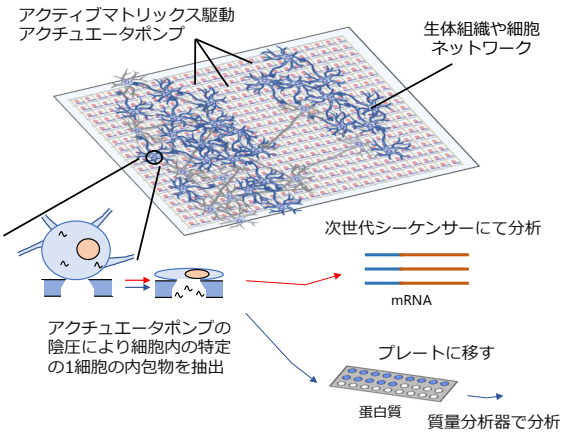

図 1　次世代高密度バイオチップの構想

ロポンプによって抽出された mRNA または蛋白質はマイクロ流路を通じて装置のサンプル排出口まで運搬され、必要に応じてカプセル化など処理した後に装置から取り出される(図１)。そして取り出されたサンプルは次世代シーケンサーや質量分析機器により分析される。この装置の構成は、抽出口および抽出物を送液する流路を備えたポンプ用マイクロ流路、ポンプの動力源であるチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)アクチュエータアレイ、そのアクチュエータを制御する制御素子を搭載したアクティブマトリックストランジスタの３層に大別される(図 2)。このうちマイクロ流路およびトランジスタは本大学の既存の技術で作製可能であるが、PZT アクチュエータアレイおよびアクチュエータとトランジスタとの集積という課題を解決する必要がある。そこで本研究ではアクティブマトリックストランジスタと集積することを前提にデザインされた PZT アクチュエータアレイの作製を目的とする。

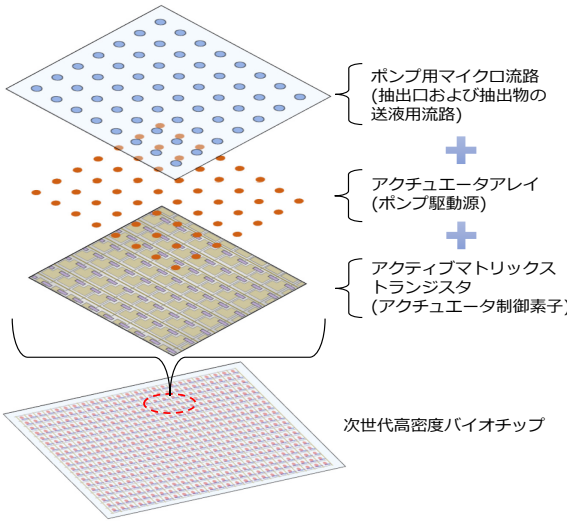

図２　次世代高密度バイオチップの構造

実験結果および考察

PZT は優秀な圧電性[3]をもち、強誘電体メモリーや圧電アクチュエータなどに用いられている。PZT 膜の作製にはスパッタ法など真空装置およびガスを用いる手法と、溶液を用いる手法が存在する。このうち溶液を用いる手法は低コストかつハイスループットな膜の作製や加工を大面積に行うことを可能にするため本研究の装置の作製手法に適している。しかし、従来法では 600 °C以上で焼成する必要があるためトランジスタの耐熱限界温度(500 °C)を超えてしまい、集積が困難であった。本研究ではサンプルに紫外線(UV)とオゾン(O_3)を照射しつつ加熱する、

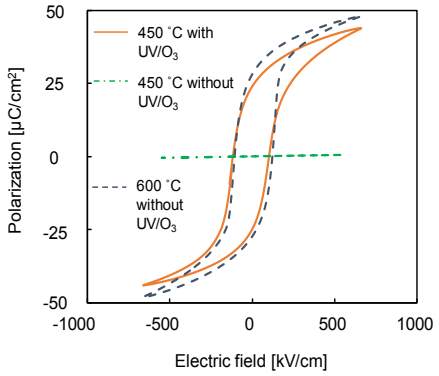

図３　各 PZT 膜の誘電特性

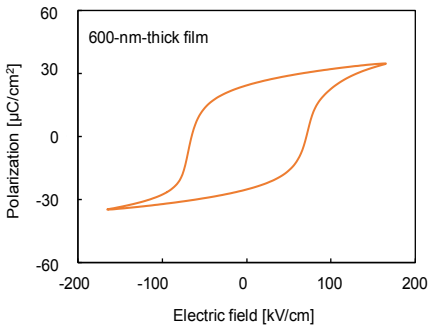

図４　積層させた PZT 膜の誘電特性

UV/O_3加熱処理を用いることで 450 °C で良質な PZT 膜を作製することに成功した。誘電特性を測定したところ、残留分極(P_r)が 23.6 μC/cm²、抗電界(E_c) が 109.6 kV/cm であり、UV/O_3加熱処理を用いずに低温で作製された PZT 膜と比較して明らかに良好であった(図 3)。また、従来法の高温焼成で作製された場合と比較して遜色ない特性であり、UV/O_3加熱処理を用いることで従来法の PZT 膜に匹敵する PZT 膜を低温で作製できることが示された。この結果から本研究の PZT 膜はトランジスタ上に直接作製可能であり、集積が容易であることが示唆された。また、この PZT 膜を積層させることで 150 nm (1 層)の膜厚を 600 nm(4 層)まで増加させたが、誘電特性に劣化は見られなかった(図 4)。よってこの結果から本研究の PZT 膜はアクチュエータの用途やデザインに合わせて膜厚を調整させることも可能であり、圧電素子としてアクチュエータに利用できることが示唆された。

そこでこの低温作製された PZT 膜を用い、アクティブマトリックストランジスタに集積するためのアクチュエータアレイを設計・作製した(図 5)。このアクチュエータアレイは各アクチュエータの上部電極を配線で繋ぐ構造に設計した。作製したアクチュエータアレイの動作確認をしたところ、アクチュエータが動作していることを確認でき、印加電圧に対して変位が増加する傾向が確認された。以上の結果から、トランジスタと集積するためにデザインされた PZT アクチュエータアレイの作製に成功したと結論付けた。

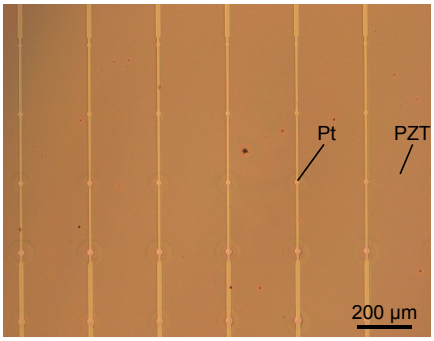

図 5　アクチュエータアレイの上部電極

論文審査の結果の要旨

本研究は、紫外線照射下のオゾン中熱処理によるチタン酸ジルコン酸鉛（PZT）圧電材料の低温成膜プロセスの開発とこれを用いたアクチュエータアレイの開発に関するものである。微小流体デバイスの魅力の一つに高集積化による高機能化が挙げられるが、流体を制御するバルブやポンプの駆動は空気圧が主流で、多数の集積化に向かないことから、高集積化・高機能化の大きな課題となっていた。圧電材料を用いたアクチュエータをその制御回路と同時にチップ上に集積化できればこの問題は大きく改善し高機能微小流体デバイス実現へのブレークスルーとなると考えられる。しかしながら従来の圧電材料の作成プロセスは700℃以上の高温を要し、制御回路との集積化を困難としていた。一方で、多くの細胞

からなる組織などを1細胞レベルで解析するために、バルブ・ポンプを高密度に集積化する必要性が高まった。本研究では、制御回路と集積可能な500℃以下の低温でPZT圧電材料を成膜可能な新規プロセスを開発し、これを用いてダイアフラム型のPZTアクチュエータアレイを実現させるものである。

第1章では、従来の微小流体デバイスにおけるフローコントロールと一細胞解析の現状について述べ、その問題点と課題に言及し、本研究の目的を明示した。

第2章では、溶液法によるPZT圧膜の低温プロセスの開発について述べている。PZT溶液を塗布し加熱焼成する途中で、紫外線を照射しながらオゾン中で熱処理を行うことで最高温度450℃でも良好な特性を示すペロブスカイト型のPZT結晶膜が作成可能なことを見出した。またそのプロセス条件を最適化し得られた膜の構造、特性を詳細に調べ、さらに低温化のメカニズムについて考察を行った。

第3章では、第2章で開発した低温プロセスを用い、実際にダイアフラム型アクチュエータを作成し、その圧電特性を評価した。ダイアフラムの作成にはSi の異方性エッチング等を用いた。レーザードップラー速度計を用いて変位量を測定し、数値シミュレーションの値と比較したところ、両者はよく一致し、アクチュエータとして動作すること、また理想的な特性のPZT膜が作成できていることが確認できた。

第4章では、薄膜トランジスタ（TFT)からなる制御回路と集積化するために、TFTアレイの作成プロセスとコンパチブルで、かつピッチ50μmの高密度なアクチュエータアレイを作成可能な、アクチュエータ構造、およびその作成プロセスを開発した。ボッシュ法によるドライエッチングを用い、ダイアフラム径30μmから作成可能なプロセスを開発し、圧電動作を確認した。また、膜厚やダイアフラム径を変化させ、アクチュエータ特性を評価し、本プロセスで作成可能な実用的な大きさを確かめた。

以上、本論文は、溶液法によるPZTの紫外線オゾン処理による低温成膜プロセスを開発し、それを用いた実用的なPZTアクチュエータアレイの作成方法を確立したものであり、学術的に貢献するところが大きい。よって博士（マテリアルサイエンス）の学位論文として十分価値あるものと認めた。