

博士論文（要約）

ミストジェットを用いた Si 微粒子吐出に関する研究

横山 吉典

目次

第1章 序論

1.1 本研究の目的	4
1.2 研究の背景と従来の研究	5
1.2.1 Si 微粒子	5
1.2.2 液滴吐出方法	6
1.2.3 従来の研究における課題	6
1.3 本研究で提案する Si 微粒子吐出技術	7
1.4 本研究の意義	8
1.5 論文の構成	9

第2章 原理・設計・製作

2.1 緒言	10
2.2 ミストジェットの吐出原理	10
2.2.1 ミスト吐出	10
2.2.2 ノズル吐出口のキャピラリー波	12
2.3 設計	16
2.3.1 ミストジェットの吐出液滴サイズ	16
2.3.2 超音波の集束方法	17
2.3.3 放物面による超音波の集束（解析解）	20
2.3.4 放物面と円錐面の超音波の集束比較（数値解析）	22
2.3.5 ウエットエッチングと機械加工ノズルの比較（数値解析）	37
2.4 ヘッド製作	39
2.4.1 Si 放物面の機械加工	39
2.4.2 Si ノズルの加工	40
2.4.3 ノズルへの撥水膜コート	42
2.4.4 ミストジェットヘッドの組立	43
2.5 結言	46

第3章 ミスト吐出の基礎特性

3.1 緒言	47
3.2 圧電素子による超音波発振	47
3.2.1 圧電素子の変位測定	47
3.2.2 圧電素子の変位解析	49
3.3 吐出性能	52

3.3.1	ミスト吐出外観	52
3.3.2	SUS 製と Si 製ヘッドの比較 (Φ6 mm 開口放物面、機械加工ノズル)	54
3.3.3	Si ノズルの製作方法による比較 (Φ6 mm 開口 Si 放物面、Si ノズル)	57
3.3.4	Φ6 mm 開口 Si 放物面と Si ノズルの基本周波数に対するミスト液滴径比較	57
3.3.5	放物面及び円錐面のミスト吐出比較 (Φ20 mm 開口 SUS 反射板、Si ノズル)	59
3.3.6	Si 微粒子吐出に使用するヘッド	66
3.4	ミスト吐出に関する考察	66
3.4.1	キャピラリー波の固有振動数	66
3.4.2	ミスト吐出条件	67
3.5	結言	70

第4章 Si 微粒子吐出

4.1	緒言	71
4.2	高純度 Si 微粒子の製作	71
4.2.1	Si 微粒子分散水の作製	71
4.2.2	ミスト吐出による Si 微粒子への不純物混入量評価	74
4.3	Si 微粒子の堆積厚	75
4.3.1	Si 微粒子ライン状堆積	75
4.3.2	Si 微粒子膜状堆積	76
4.4	Si 微粒子膜状堆積の特徴	79
4.4.1	酸化膜厚	79
4.4.2	水素結合	81
4.5	結言	82

第5章 Si 微粒子膜の特性評価

5.1	緒言	83
5.2	Si 微粒子膜の電気特性	84
5.2.1	Si 微粒子膜の作製方法	84
5.2.2	Si 微粒子膜の電気特性評価	85
5.3	Si 微粒子膜によるフォトダイオード製作	91
5.4	結言	94

第6章 結論

6.1	結論	95
6.2	今後の展望	96

参考文献	97
発表論文	100
謝辞	102

第1章 序論

1.1 本研究の目的

本研究の目的は、サブミクロンサイズの大きな Si 微粒子（結晶）を必要な個所に堆積させることである。そのために、微小液滴の中に Si 微粒子（結晶）を入れて吐出する技術の確立を目指す。この技術によって、フレキシブル基板の必要な個所のみ、結晶の Si 微粒子を吐出して堆積することが可能になる。結晶の Si 微粒子により近赤外光を受光できるようになり、Si 微粒子の不要な個所でフレキシブル基板を折り曲げることも可能となる。

フレキシブル基板上に結晶 Si を成膜する主な方法には、P-CVD による微結晶 Si の成膜 [1]がある。しかし、この手法では、基板全面への成膜が避けられない。そのため、不要部分にまで、結晶 Si が成膜されてしまい、結晶 Si の不要な場所で折り曲げや湾曲させるなどのフレキシブル性を利用することができない。

この問題点を解決するために、Si 微粒子（結晶）を微小液滴の中に入れて必要な個所に吐出し堆積する手法が考えられる。しかし、この手法には、主に以下の2つの課題がある。

第1に、Si は容易に酸化されるため、Si 微粒子にはすぐに自然酸化膜が形成され、絶縁されてしまう。その上、基板に吐出後、液滴の蒸発時に、液滴のエッジにピン止めされて、Si 微粒子が凝集すると、その微粒子間の自然酸化膜を還元できない。その結果、微粒子を堆積させても、そのままでは電気特性を評価することができない。

第2に、微粒子を微小液滴の中に入れて吐出する方法は、気相成長に比べ不純物が混入しやすく、Si 微粒子膜の電気特性が劣化する。Si 微粒子を近赤外センサとして利用するためには、不純物がほとんど混入していないことが必要となる。さらに、Si 微粒子自体も高純度であることが求められるが、入手が容易な Si 微粒子は、金属シリコン（純度 99.8% : 半導体素子や太陽電池として使用するグレードよりは低純度）を原料に粉砕しているため、不純物濃度が高く、電気特性評価には使用できない。

以上のような背景があり、Si 微粒子を電気特性評価に使用する研究はほとんど行われていない。

本研究では、上記2つの課題を解決することにより、Si 微粒子を必要な個所へ堆積させ

ることを可能とする。Si 微粒子（結晶）を堆積させることによって、近赤外光を受光できるようにし、Si 微粒子の不要な個所でフレキシブル基板を折り曲げることが可能であることを理論的に示す。これらの成果によって、フォトダイオードを 5 面に配置して傾斜方位を測定する太陽光追尾センサや、近赤外光を利用した近接センサとなる湾曲光センサなどの作製が可能となる。

1.2 研究の背景と従来の研究

1.2.1 Si 微粒子

シリコンは地球の構成元素のひとつであり、地殻中では酸素に次いで多い元素で、重要な鉱物資源である。1950 年代にシリコンの不純物制御技術[2]は完成し、シリコンの高純度な結晶を工業的に作製することが可能となった。それ以来、半導体の中でもシリコンの研究は非常に活発に行われてきており[3]、単結晶インゴットをスライスしてシリコンウェハとして利用することで、各種半導体素子をはじめ、太陽電池パネルや液晶パネル、各種 MEMS センサなど、様々なところで活用されている。

Si の成膜は、Si は容易に酸化されるため、主に P-CVD を代表に真空装置を用いて行われてきた[12]。また、P-CVD によるアモルファス Si 成膜時の条件を調整することにより、結晶 Si をアモルファス Si 内に成長させる微結晶 Si 膜[1]の研究も行われてきた。この場合、微結晶 Si 膜の粒子サイズは、数 10 から数 100 nm となる。

Si 微粒子の作製には、大きく 2つの方法がある。まず第 1 に、気相成長法やレーザーアブレーション法（Si ターゲットにレーザー光を照射してアブレーションを起こし希ガス中で冷却して作成する手法）によって、ナノレベルの微粒子を作製する方法がある。作製される Si 微粒子の粒径は、ガス圧力、蒸発温度、捕集位置に依存し、一般にガス圧力・蒸発温度が高いほど微粒子の粒径は大きくなる。0.1 torr～15 torr で作製されると Si の微粒子の平均粒径は 5～50 nm[14]となる。これらの方法では、純度の高い Si 微粒子を作製できることが特徴である。第 2 に、結晶 Si の塊を粉砕して作成する方法がある。この方法では、サブミクロンサイズの Si 微粒子を、短時間で大量に作製することができる。

Si 微粒子は、径のサイズがナノレベルまで小さくなり、室温での電子の平均自由行程 350 Å に近づいてくると、キャリアが微粒子表面で散乱をうけるサイズ効果が現れてくる[14]。粒子サイズが 100 nm を超えれば、キャリアの移動度は単結晶 Si のように高くなることが示されている[13]。従って、近赤外光を受光する結晶の特徴を生かした機能を発揮させるためには、粒子サイズは 100 nm を超える必要がある。また、キャリアの移動度は結晶粒界の影響を受けるため、そのサイズはより大きい方が望ましい。ただし、大きな微粒子ほど、ストークスの式に従い落下が早いいため、所望の位置に堆積させることは難しくなる。さらに、Si は不純物のない高純度の方が、近赤外光を受光する結晶の特徴を生かす上で望ましい。

1.2.2 液滴吐出方法

Si 微粒子の堆積方法には、乾燥した固体状態をガス流で堆積させる方法と液体の中に分散させて堆積させる方法がある。前者は、所望の位置に堆積させることが困難であり、基板への付着も難しい。後者の方法では、液体を利用しているため、液体の付着力を利用できるが、スピコートやスプレーコートなどの方法では、所望の位置に堆積させることが困難である。これらの点で優れた方法として、微小液滴の中に Si 微粒子（結晶）を入れて吐出する方法がある。所望の位置に堆積させることが可能で、吐出後に基板と液体との付着力も利用でき、基板のサイズにもフレキシブルに対応することができる。

この液滴吐出技術の中では、近年、インクジェットが注目を集めている。インクジェットは、圧電素子の撓み振動とノズルを用いて、液滴を 1 滴ずつ吐出する技術である。ノズル径と押し出す液滴量で液滴径が決定されるが、20 μm のノズル径を使って、最小 16 μm 径の液滴を吐出することができる[4]。インクジェットの利点として、駆動側の制御だけでマスクレスでパターンニングが可能であり、必要な個所へ必要な量だけ材料を供給できるため、材料の無駄が少ない点があげられる。このため、さまざまな用途への展開が検討されている[5, 6]。こうした中でシリコンの成膜でも、微粒子のような固体ではないものの、液体のシリコン前駆体材料の開発に成功している。窒素雰囲気下でスピコートやインクジェット法を用いて塗布し、多結晶 Si 膜を成膜することで、シリコン薄膜トランジスタ(TFT)を作製することに成功している[7]。

さらに、液滴吐出法には、圧電素子の厚み縦振動を利用して超音波を発生させ、音響レンズなどを用いて集束し、液滴を吐出する音響インクジェットと呼ばれる方法もある[8-11]。音響フレネルレンズを用いた方法では、液滴吐出径 17 μm (2.7 pl, 駆動周波数 110 MHz)[10] や、13 μm (1.2 pl, 駆動周波数 177 MHz)[9]のサイズの吐出が可能である。また、音響レンズを用いずに、圧電素子の電極の形状をフレネルレンズ状に加工することで、超音波の集束を図り 5 μm (駆動周波数 600 MHz)の液滴吐出を行う技術[11]もある。これらはいずれも、超音波の集束径で液滴径を決定しており、ノズルレスで液滴を吐出することができる。

1.2.3 従来の研究における課題

Si 微粒子と液滴吐出方法について、従来の研究を概観してきた。Si 微粒子を必要な個所に堆積させ、近赤外光を受光するためには、凝集と純度の2点が課題となる。

(凝集)

インクジェットによる最小液滴径は 16 μm と大きく、音響インクジェットでは、駆動周波数 600 MHz で最小 5 μm である。駆動周波数を上げてさらに小さくするのは、すでに水中の波長は 2.5 μm となっており困難である。このように液滴サイズが大きい場合、液体が浸透しない基板では、液滴が基板に到達して蒸発する際に、液滴のエッジがピン止めされて、微粒子がそのエッジにリング状に凝集する、いわゆるコーヒーリング効果[15]が発生する点である。

微粒子同士が凝集すると、自然酸化膜により絶縁され、その間の電氣的結合ができなくなる。吐出する液滴のサイズを小さくし、蒸発する時間を短縮できれば、エッジに凝集する効果を抑えることが可能になる。そのため、最小液滴径をさらに小さくする必要がある。

また、インクジェットでは、ノズル部やインク経路でのつまりが問題となる。つまりを防ぐために、粒子径は 100 nm 以下に制限される。音響レンズを用いたノズルフリーインクジェットでは、液滴径 1mm で平均粒径 1.8 μm の蛍光粉体スラリーを吐出した例[8]があるものの、液滴径が非常に大きく、微小液滴が吐出できないという課題が残る。

Si 微粒子は凝集しない場合も、単体では自然酸化膜が形成され、絶縁されてしまう。そのため、微粒子の自然酸化膜を還元後、アモルファス Si を微粒子上に成膜することで Si 微粒子膜を形成し、電気特性を評価する。その際、微粒子サイズが大きくなると、アモルファス Si で覆うことができなくなる可能性がある。このため、微粒子サイズはサブミクロンから 1 μm 程度がよいと考えられる。

(純度)

Si 微粒子は、不純物の混入のないもの入手が難しい。不純物混入の観点からすると、結晶を成長させていく手法がよいと考えられるが、サブミクロンから 1 μm まで成長させることは難しく、作製できる量も少ない。このため効率がよいのは、バルクを粉砕して微粒子を作製する方法であるが、不純物の混入量が多くなる。

また、乾燥した微粒子を液体内に入れ攪拌する際には、微粒子が凝集体を形成するので、微粒子を分散させるのも難しい。Si 微粒子を液体内に分散するために、分散剤を使用すると、その分散剤が不純物となる。さらに、Si 微粒子を液滴の中に入れて吐出する液滴吐出装置の壁面などに接触すると、その壁面の材質が不純物として混入する課題もあった。

1.3 本研究で提案する Si 微粒子吐出技術

本研究では、上記 2 つの課題を克服するために、微小液滴の中に Si 微粒子（結晶）を入れて吐出する方法を確立する。その際、吐出する Si 微粒子は、結晶として近赤外光を受光できるように、サブミクロンサイズを適正サイズとして採用する。

まず第 1 の課題の凝集を防ぐために、微小液滴の中に入れて Si 微粒子を吐出する技術として、ミストジェットを提案する。インクジェットや音響インクジェットなどの従来の液滴吐出技術よりも、非常に小さい液滴を群として吐出できる手法として、ミストジェット [16,17]がある。このミストジェットを使用すると、平均液滴径 2.5 μm の微小液滴群（ミスト）を連続的に吐出することが可能となる。このような小さい液滴では、基板に到達して液体が蒸発する時間が非常に短くなるため、コーヒーリング効果を抑制することが可能となる。ところが、ミストジェットは、プリンターとして開発された技術で、染料系インクを紙に吐出する技術であり、Si 微粒子をはじめ、微粒子を吐出したことがない。このミストジェットは、集束超音波とノズルを使用して微小液滴群を吐出している。ノズル径が 50

μm とインクジェットよりも大きく、ノズルエッジを固定端として液面がピン止めされ、液面のキャピラリー波の固有振動数で、先端部から微小液滴群が吐出する。この液滴の中に Si 微粒子を入れて吐出できるかが課題である。

ミストジェットで使用している超音波には、凝集を防止する効果がある。超音波を照射して、水中のナノシリカ粒子の分散挙動を調べた研究では、40 nm のナノシリカ粒子の粒度分布は、初期の 38 μm から 1 MHz の超音波照射後には、0.85 μm に解砕されている[18]。本研究の Si 微粒子のミストジェット吐出でも、水中での Si 微粒子の凝集を防止する効果はあると考えられる。

次に第 2 の課題の不純物の混入を防ぐために、Si 微粒子と衝突する可能性のある個所を吐出する材料と同じ高純度結晶 Si で作製する。ミストジェットでは超音波を放物面反射板で集束し、さらにノズルで高密度化しているため、微粒子の接触する放物面反射板やノズルが不純物として混入する可能性がある。そこで、放物面反射板とノズルを高純度結晶 Si で製作する。次に、高純度 Si 微粒子の作製には、高純度合成石英製遊星ミルを使用する。Si 微粒子と接触するボールやミルの元素は Si と O のため、高純度な Si 微粒子の作製が可能となり、電気特性の劣化を防ぐことができる。また、使用する液体としては、水を選択した。構成元素は、H と O だけなので、Si 微粒子に対して不純物とならない点、さらに、Si 微粒子に生成される自然酸化膜は、親水性であり、分散剤が不要になると考えられるからである。

以上、Si 微粒子（結晶）を堆積させる技術を確認した後、近赤外光を受光することが可能となっているかを検証する。

1.4 本研究の意義

本研究の特徴は、サブミクロンサイズの大きな高純度結晶 Si 微粒子を、微小液滴(2.5 μm)の中に入れてノズルから吐出し、所望の位置に凝集なく堆積させる技術を確認した点である。さらに、高純度な結晶 Si 製ヘッドを使い、高純度な結晶の Si 微粒子を吐出し、不純物の汚染のない Si 微粒子を堆積させることを可能にした。

フレキシブル基板の必要な個所のみで結晶の Si 微粒子を吐出し、微粒子の自然酸化膜を還元後、アモルファス Si を成膜することで、結晶 Si 微粒子の機能を実現することを可能とした。Si 微粒子同士で電氣的接続をとることができれば、アモルファス Si を使用する必要はないが、困難である。微粒子との電氣的接続をとるためのアモルファス Si をパターンニングするだけで、フレキシブル性が必要なところを折り曲げたりできる。これによって、近赤外光を含めたセンサとして、フォトダイオードを 5 面に配置して傾斜方位を測定する太陽光追尾センサや、近赤外光を利用した近接センサとなる湾曲光センサなどの作製が可能となり、非常に大きなインパクトがある。

1.5 論文の構成

本論文は、6章で構成されている。以下に各章の概要を示す。

第1章 序論

本研究の目的について述べ、本研究の背景およびそれに関連する従来の研究と課題についてまとめた。また、提案するミストジェット法の概要を述べ、特徴、意義を論じた。

第2章 原理・設計・製作

ミストジェットのノズル開口部でのキャピラリー波の固有振動数を求め、ミストジェットの吐出原理を述べる。また、吐出するSi微粒子や吐出する液滴の適正サイズを決定する。キャピラリー波を発生させている力は、圧電素子の振動による超音波圧力で、ミストを吐出するためには、一定以上の音圧により加振する必要がある。そこで、集束超音波の数値解析を行い、最適なヘッド形状の検討を行う。また、不純物が混入すると膜特性に影響を与えてしまうので、不純物混入の原因と考えられる超音波を集束させる反射板やノズルをSi製にする検討を行い、ミストジェットヘッドを試作する。

第3章 ミスト吐出の基礎特性

超音波を発生させる圧電素子の振動シミュレーションと、測定結果を比較する。ミストジェットヘッドで吐出したミストの粒度分布の測定結果から、各種ヘッドの比較を行い、最適なヘッド仕様を決定する。

第4章 Si微粒子吐出

高純度Si微粒子の製作方法の検討から開始し、作製したSi微粒子分散水を用いて、ミスト吐出したSi微粒子の不純物量を評価する。さらに、Si微粒子分散水を使用して、ミスト吐出によるパターンニングや堆積厚の評価を行うとともに、堆積したSi微粒子の特徴を示す。

第5章 微粒子膜の特性評価

石英ガラス基板の上に、Si微粒子を含んだ液滴を吐出後、アモルファスSiを成膜して、作製したSi微粒子膜の特性を評価する。さらに、p型Si基板の上に、n型Si微粒子膜を作製することでフォトダイオードを製作し、その特性を評価する。これらの実験から、Si微粒子が結晶として機能することを確認する。

第6章 結論

本研究によって得られた、サブミクロンサイズの大きなSi微粒子を必要な個所に堆積させるのに必要な知見をまとめ、結論および今後の展望をまとめる。

pp.10-96 は学術論文誌投稿予定のため、2021年9月2日まで非公開。

参考文献

- [1] A. Matsuda, "Microcrystalline silicon. Growth and device application," *Journal of Non-Crystalline Solids*, 338-340, pp.1-12, 2004.
- [2] 庄野克房. 半導体技術 (上) . 東京大学出版会, 1976, pp.55-60, (物理工学実験, 2).
- [3] L. E. Katz, D. W. Hill, "Gas doping of float zone silicon crystals in vacuum from a solid source using pressure differential to transport dopant," *Journal of Crystal Growth* 19, pp.113-116, 1973.
- [4] 張 俊華, "インクジェットプリンターヘッド", セラミックス Vol. 42, No.1, 2007, pp.51-53.
- [5] 下田達也, "マイクロ液体から直接に薄膜デバイスを形成する技術—マイクロ液体プロセス— 1.マイクロ液体プロセスの概要と有機デバイスへの適用", まてりあ Vol. 44, No.4, 2005, pp.324-332.
- [6] 下田達也, "マイクロ液体から直接に薄膜デバイスを形成する技術—マイクロ液体プロセス— 2.無機薄膜への適用と興味ある応用", まてりあ Vol. 44, No.5, 2005, pp.411-418.
- [7] T. Shimoda, Y. Matsuki, M. Furusawa, T. Aoki, I. Yudasaka, H. Tanaka, H. Iwasawa, D. Wang, M. Miyasaka and Y. Takeuchi, "Solution-processed silicon films and transistors," *Nature* Vol 440, pp.783-786, 6 April 2006.
- [8] 横山久範, 柘植英明, 尾畑成造, 釜井正善, 阿部浩也, 内藤牧男, "ノズルフリーインクジェット成形における描画特性に及ぼすプロセス条件の影響", 粉体工学会誌 Vol.46 No.1, 2009, pp.13-19.
- [9] 浜崎聡信, 森田直己, "フレネルレンズを用いた音響インクジェットの噴射挙動とドロップ変調", 日本機械学会論文集 (C編) Vol.67, No.657, 2001-5, pp.1247-1254.
- [10] B. Hadimioglu, S. Elrod, and R. Sprague, "Acoustic Ink Printing: An Application of Ultrasonics for Photographic Quality Printing at High Speed," in *Proc. 2001 IEEE Ultrasonics Symposium*, 2001, pp. 627-635.
- [11] Dai Huang and Eun Sok Kim, "Micromachined Acoustic-Wave Liquid Ejector," *Journal of MicroElectroMechanical Systems*, Vol. 10, No. 3, 2001, pp.442-449.
- [12] Akihisa Matsuda, Takao Kaga, Hideo Tanaka, Lalit Malhotra and Kazunobu Tanaka, "Glow-Discharge Deposition of a-Si:H from Pure Si₂H₆ and Pure SiH₄," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 22, No. 2, pp.L115-L117, 1983,.
- [13] 近藤道雄, "微結晶シリコン薄膜—アモルファス物質と結晶の間にある諸問題—", 応用物理, 第 68 巻第 10 号 1999, pp.1133-1139.
- [14] 白藤純嗣, "半導体微粒子", 粉体工学会誌 Vol.23, No.1, 1986, pp.23-30.

- [15] Robert D. Deegan, Olgica Bakajin, Todd F. Dupont, Greb Huber, Sidney R. Nagel, and Thomas A. Witten, “Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops.” *Nature* 389, pp.827–829 (1997).
- [16] H. Fukumoto, J. Aizawa, H. Nakagawa, H. Narumiya, Y. Ozaki, “Printing with Ink Mist Ejected by Ultrasonic Waves,” *The Journal of IMAGING SCIENCE and TECHNOLOGY*, Vol. 44, No.5, pp.398-405 (2000).
- [17] 亀山俊平、福本宏、和高修三、“集束超音波とノズルを用いたプリントヘッドのインク滴吐出に関する検討”、日本音響学会誌、Vol. 60, No. 2, pp.53-60 (2004).
- [18] 佐藤絵美子、高井千加、白井孝、藤正督、“超音波照射による水中ナノシリカ粒子の分散挙動一周波数と凝集径の関係”、第 46 回東海若手セラミスト懇話会 2013 年夏期セミナー予稿集、p.33.
- [19] 千葉近、“超音波噴霧”、山海堂、(1990)、pp.45-46, pp.170-173.
- [20] 鈴木浩平、西田公至、丸山晃市、渡辺武、“機械工学のための振動・音響学”、サイエンス社(1989), pp.169-171.
- [21] ANSYS Mechanical APDL 理論リファレンス リリース 16.0 January 2015, pp.225-227, p664.
- [22] M. G. Mauk, “Silicon Solar Cells : Physical Metallurgy Principles,” *JOM*, vol.5, May, pp.38-42 (2003).
- [23] J.R. Davis, A.J. Rohatgi, R.H. Hopkins, P.D.Blais, P.R.Choudhury, J.R. McCormick, and H.C. Mollenkopf, “Impurities in Silicon Solar Cells”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.ED-27, No.4, 1980, pp.677-687.
- [24] 森田一樹、吉川健、“太陽電池用シリコン精製における問題点とその新展開”、*まてりあ* 第 46 巻第 3 号, p133-136, 2007.
- [25] ダイキン工業製オプトツール DSX の紹介ホームページ
<http://www.daikin.co.jp/chm/products/optool/dsx.html>
- [26] ダイキン工業製ネオフロン FEP の紹介ホームページ
<http://www.daikin.co.jp/chm/products/resin/neoflon-fep.html>
- [27] 旭硝子製 CYTOP の紹介ホームページ
<http://www.agc.com/kagaku/shinsei/cytop/>
- [28] 日本液体微粒化学会編、“アトマイゼーションテクノロジー”、森北出版、2001、p.22-25.
- [29] フリッチュ・ジャパン株式会社の遊星型ボールミル P-7 クラシックラインの紹介ホームページ <http://www.fritsch.co.jp/p7.html>
- [30] M.Morita, T. Ohmi, E.Hasegawa, M.kawakami, and M. Ohwada, “Growth of native oxide on a silicon surface,” *Journal of Applied Physics* Vol.68, No.3, 1990, pp.1272-1281.

- [31] 余田浩好、伊藤直樹、“微小径ビーズを用いた湿式ビーズミル処理によるナノシリカ粒子の分散性検討”、粉体工学会誌 Vol. 41, No. 6, 2004, pp.457-464.
- [32] 青木 隆一、“粉粒体の性質”、計測と制御、Vol. 11 (1972) No. 7, pp.648-661.
- [33] Peter J. Yunker, Tim Still, Matthew A. Lohr and A. G. Yodh, Suppression of the coffee-ring effect by shape-dependent capillary interactions, Nature 476, P308-311(2011).
- [34] 大竹信行、南条淳二、野村滋、原進一、“赤外線吸収と電子線回折法による Si 陽極酸化膜の構造評価”、室蘭工業大学研究報告.理工編 Vol.7 No.3, pp.679-691, 1972.
- [35] 近沢正敏、武井孝、“粒子表面のキャラクタリゼーションー粒子表面特性と粉体物性ー”、粉体工学会誌 Vol. 36, No. 3, 1999, pp.205-213.
- [36] 武井孝、安宅真和、小西とも子、藤正督、渡辺徹、近沢正敏、“シリカの表面水酸基の構造評価ー化学反応法と分子吸着法ー”、粉体工学会誌 Vol. 36, No. 3, 1999, pp.179-184.
- [37] 山田興一、小宮山宏. 太陽光発電光学、太陽電池の基礎からシステム評価まで. 日経 BP 社, 2002, p.25.
- [38] 恒藤敏彦. 弾性体と流体. 岩波書店, 1983, pp.42-49, pp.163-168 (物理入門コース, 8).
- [39] Young Kwon Kim, Jiwoo Hong, Kwan Hyoung Kang, Sang Joon Lee, Joonwon Kim, “Capillary waves in a sharp-edged slit driven by vertical vibration”, Experimental Thermal and Fluid Science Vol. 71, 2016, pp.52-56.
- [40] A. J. Yule and Y. Al-Suleimani, “On droplet formation from capillary waves on a vibrating surface”, Proceedings of the Royal Society A(2000) 456, pp.1069-1085.
- [41] 巽友正、流体力学、培風館、1982, pp.79-95 (新物理学シリーズ 21).

発表論文

国際論文誌

- [1] Yoshinori Yokoyama, Kiyoshi Matsumoto, and Isao Shimoyama, "Microparticles in a Silicon Film Created Using Mist-Jet Technology to Expand the Absorption Wavelength" Sensors and Actuators A, Vol.232,No.1, pp190-194, 2015.

国内論文誌

- [2] 横山吉典、村上隆昭、吉田幸久、伊藤寿浩, 「Si ノズルを用いた Si 微粒子のミスト吐出」, 電気学会論文誌 E, Vol.131 No.6, pp.230-234, 2011.
- [3] Yoshinori Yokoyama, Takaaki Murakami, Takashi Tokunaga and Toshihiro Itoh, "Silicon Microparticle Ejection Using Mist-jet Technology", Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging Vol.4 No.1,pp.1-5, December 2011.

国際会議

- [4] Yoshinori Yokoyama, Takaaki Murakami, Takashi Tokunaga and Toshihiro Itoh, " Silicon Microparticle Ejection Using Mist-jet Technology ", ICEP2011 International Conference on Electronics Packaging. TD3-2, pp.460-463.
- [5] Y. Yokoyama. T. Takahata, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "MICROPARTILCES IN SILICON FILM USING MIST-JET TECHNOLOGY FOR A PHOTODETECTOR", the 26th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2013), pp.279-282, 2013.

国内会議

- [6] 横山吉典、村上隆昭、吉田幸久、伊藤寿浩, 「ミストジェット技術による Si 微粒子吐出」, 第 26 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム,B4-2,2009.
- [7] 横山吉典、村上隆昭、吉田幸久、伊藤寿浩,「ミストジェット技術を用いた Si 微粒子塗布」,第 24 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会 12B-13,2010.
- [8] 横山吉典, 村上隆昭, 吉田幸久, 伊藤寿浩,第 27 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム,B2-3, pp.80-83,2010.
- [9] 横山吉典, 村上隆昭, 徳永隆志, 伊藤寿浩,「異方性エッチングによる Si ノズルを用いた Si 微粒子のミスト吐出」,第 25 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会 10C-15,pp.349-350, 2011.

受賞

- [4] ICEP2011 Award (ICEP2011 Outstanding Technical Paper Award),
Yoshinori Yokoyama, Takaaki Murakami, Takashi Tokunaga, Toshihiro Itoh,
“Silicon Microparticle Ejection Using Mist-jet Technology“

謝辞

本論文の内容は、2008年から2011年までにかけて、技術研究組合 BEANS 研究所で行った研究と2011年から2016年にかけて、東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻下山・松本・高畑研究室で行った研究をまとめたものである。

指導教員である下山勲教授には、研究内容に関して数多くのコメントをいただくなど、丁寧なご指導をしていただいた。特に、論文における論理の展開の仕方やまとめ方において、数多くのご指導をいただいた。松本潔特任教授、高畑智之講師にも適切な助言やご指導いただいた。また、東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻の高木周教授には、集束超音波の音響解析や表面波の解析に関して、数多くのご指導をいただいた。

三菱電機の福本宏部長には、この研究をはじめのきっかけを作っていただいた。BEANS 研究所では、伊藤寿浩 Macro BEANS センター長には、実験の方法や考察に関して、数多くの助言をいただき、博士課程への入学を勧めていただいた。BEANS 研究所でともに研究を行った吉田幸久氏、村上隆明氏、徳永隆氏をはじめ、多くの同僚とは、お互いに切磋琢磨することができた。

社会人博士課程入学後は、同研究室の磯崎瑛宏氏にはいろいろと研究室のことを教えていただいた。また、同研究室の仲間からは多くの刺激を受け、研究へのモチベーションを高めることができた。

予期せぬ発病により1年3か月間の休学をすることになったが、復学後、下山教授には、体調に配慮しながらの論文指導をしていただいた。また、研究室の方々にも、研究の発表や研究会への参加に関し、いろいろ手助けをいただいた。

本論文をまとめることができたのは、これら多くの方々からのご協力があったからこそである。心より感謝申し上げます。

最後に、社会人博士課程で学位取得を積極的に応援してくれた、家族、特に妻、真貴子には感謝しています。