

# 超音波スプレー技術を用いた 次世代半導体洗浄技術に関する研究

[研究代表者] 清家善之 (工学部電気学科)  
[共同研究者] 本多祐二 (本多電子株式会社)

## 研究成果の概要

近年、半導体デバイスの微細化進み ITRS(International Technology Roadmap of Semiconductor)2.0 によると 2020 年には DRAM (Dynamic Random Access Memory)の最小線幅が 10nm になると示され、分子レベルの微細が進んでいる。半導体デバイスの製造工程において、シリコンウェハと呼ばれるシリコン基板上のナノメートルオーダーの異物 (パーティクル) の除去の必要性から、製造工程の 1/3 は洗浄工程とされている。半導体デバイスは 1 バッチ 25 枚のフープ (カセット) の単位で、アンモニア水、過酸化水素水、塩酸等に温度をかけた薬品に、順次浸漬させる RCA 洗浄が一般的であった。しかし最近では、環境負荷低減の目的や半導体のデバイスの多品種化のため枚葉式の洗浄方法が求められ、純水をスプレーする洗浄工程が増えてきている。枚葉式洗浄において超音波振動体型洗浄装置は有効な洗浄方法であり、現在多くの工程で使用されている。超音波振動体による洗浄は超音波振動子から純水に超音波の振動を与えることによって水分子を加速させ、洗浄する方法である。超音波の周波数が高いほど小さなパーティクルが落ちる特性を持ち、洗浄対象のパーティクルが小さくなると、より高い周波数の振動が必要となる。しかし上述した分子レベルの配線幅になると水の表面張力のために水が配線間に入らず洗浄不良になる問題や超音波振動で配線にダメージを起こしてしまうという問題がある。本研究では、本多電子株式会社と共同で、周波数 5MHz ~10MHz の超音波振動体技術を用いて、次世代の半導体デバイス洗浄技術を目指す。本年度においては、フィジビリティスタディーとして、直径 1 $\mu$ m のポリエスチレンラテックス(PSL)粒子をシリコンウェハ上に塗布したサンプル基板を用いて、超音波振動体型洗浄装置の能力を確認した。

研究分野：電気電子材料、品質工学

キーワード：半導体デバイス、超音波洗浄、ポリエスチレンラテックス(PSL)粒子、洗浄、純水、エレクトロスプレー

### 1. 研究開始当初の背景

近年、半導体デバイスの微細化進み ITRS(International Technology Roadmap of Semiconductor)2.0 によると 2020 年に DRAM (Dynamic Random Access Memory)の最小線幅が 10nm と示され、分子レベルの微細が進む。最近の新聞発表では、台湾 TSMC 社が配線間 5nm の半導体デバイスの試作を始めたとの報道がなされている。この半導体デバイスの製造工程において、シリコンウェハと呼ばれるシリコン基板上のナノメートルオーダーの異物 (パーティクル) の除去の必要性から、製造工程の 1/3 は洗浄工程とされている。半導体デバイスは 1 バッチ 25 枚のフープ (カセッ

ト) の単位で、アンモニア水、過酸化水素水、塩酸等に温度をかけた薬品に、順次浸漬させる RCA 洗浄が一般的であった。しかし最近では、環境負荷低減の目的や半導体のデバイスの多品種化によって枚葉式の洗浄が求められている。枚葉式洗浄装置方法の一つに超音波洗浄がある。この方法は超音波振動体による洗浄は超音波振動子から純水に超音波の振動を与えることによって水分子を加速させ、洗浄する方法であり、超音波の周波数が高いほど小さなパーティクルが落ちる特性を持ち、洗浄対象のパーティクルが小さくなると、より高い周波数の振動が必要となる。しかし上述した分子レベルの配線幅になると水の表面張

力のため、水が配線間に入らず洗浄不良になる問題や超音波振動で配線にダメージを起こしてしまうという問題がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、周波数 5MHz ~ 10MHz の超音波振動体技術を用いて、次世代の半導体デバイス洗浄技術を目指すことである。本年度においては、フィジビリティスタディーとして、直径 1 $\mu$ m のポリエチレンラテックス(PSL) 粒子をシリコンウェハ上に塗布したサンプル基板を用いて、超音波振動体型洗浄装置の洗浄能力を確認した。

## 3. 研究の方法

### (1) PSL 粒子付着モデル

図 1 に基板上に付着したポリエチレンラテックス(PSL) 粒子のモデルを示す。サブミクロンの PSL 粒子が基板表面に付着した場合、PSL 粒子にファンデルワールス力、重力、液架橋力、静電気量、電気二重層による反発力が働いているが、PSL 粒子のシリコンウェハへの付着はファンデルワールス力が支配的とされている。PSL 粒子の付着力は式 1 で与えられる。

$$F_{vdw} = \frac{AR}{6Z_0^2} \quad (1)$$

ここで、 $F_{vdw}$  はファンデルワールス力、 $A$  は Hamaker 定数、 $R$  は PSL 粒子半径、 $Z_0$  は PSL 粒子と基板の表面間距離である。ただしこの式では熱処理による影響は考えていない。

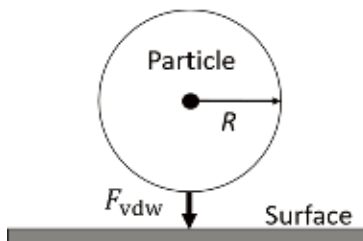


図 1 PSL 付着モデル

### (2) 超音波洗浄装置

#### ① PSL 粒子の除去モデル

シリコン基板に付着した PSL 粒子の除去モデルを図 2 のように考える。超音波振動体型洗浄によって、流体力学の作用のみで考えた場合、ウェハ上の PSL 粒子は衝撃圧から受ける力と放射流による流体抵抗によって除去されていると考えられ、せん断力からの放射流のみを考えると

PSL 粒子が受けるせん断力は式 2 で示される。

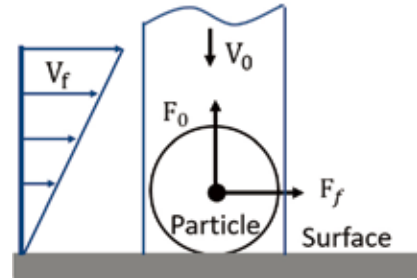


図 2 超音波洗浄による PSL 粒子除去モデル

$$F_f = C_D \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \left( \frac{\rho_L V_f^2}{2} \right) \quad (2)$$

ここで  $C_D$  は PSL 粒子がスプレーから受ける抗力係数、 $d$  はパーティクルの直径、 $\rho_L$  は純水の密度、 $V_f$  は純水の放射流の速度である。

また超音波洗浄から噴流する純水の放射流の速度は、式 3 で表される。

$$V_f = \sqrt{\alpha C_L A \omega} \quad (3)$$

ここで、 $C_L$  は純水中の音速、 $a$  は無次元係数である。

ここで  $F_{vdw} < F_f$  であれば、基板に付着した PSL 粒子は除去できることになる。

### (3) 洗浄実験

#### ① サンプル基板の作成

超音波振動体型洗浄の効果を定量的に評価するために、シリコン基板に JSR ライフサイエンス株式会社製の直径 1 $\mu$ m の PSL 粒子 (型式 SC-103-S) を付着させたサンプル基板を作製する。PSL 粒子を散布するのは、スピコート法等検討した結果、エレクトロスプレー法で行うことにした。エレクトロスプレーの霧化の様子を図 3 に、実際に PSL 粒子を散布したシリコン基板表面の顕微鏡写真を図 4 に示す。また PSL 粒子散布後にベーク処理を行い、PSL 粒子の付着力を調整した。



図 3 エレクトロスプレーの様子 (9kV, 0.1mL/h)

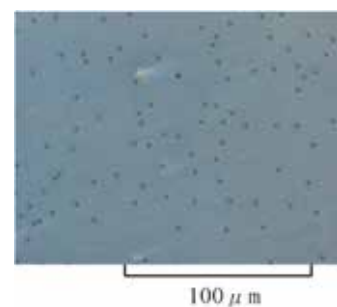


図 4 サンプル基板表面に散布した PSL 粒子

## ②洗浄実験

超音波振動体洗浄の出力と洗浄力との関係を定量的に調査する実験を行った。実験では、図5に示す本多電子株式会社の超音波振動体洗浄機（型式 W-357-1MPD 周波数 1MHz 最大出力 40W、流量 0.9l/min）を使用した。超音波振動体洗浄はノズル先端から放射された流水に超音波を重畳させて洗浄するポイントタイプの流水式である。特徴として流水式のためパーティクルの再付着がなく、高周波数なのでサブミクロンのパーティクル除去が可能である。また、低出力なのでデバイスへの低ダメージ、出力を調整することで洗浄力も可変できる。

図6は実際に汚れサンプル基板を洗浄している様子である。スピンドル上にシリコンウェハを設置し 50min<sup>-1</sup>の回転数で回転させ、その上から超音波振動体洗浄装置のノズルからスプレーする。その後、回転数 1500min<sup>-1</sup>、30秒間スピン乾燥する。

洗浄評価は、超音波振動体洗浄装置で洗浄した前後で、PSL 粒子の数をカウントし、除去率を求めた。付着力を調整するためにサンプル基板のバーク温度を 90℃、100℃、110℃の3水準とし、15分間行った。また超音波振動体洗浄装置の出力を0から40kWの5水準とした。



図5 超音波振動体洗浄機  
(本多電子社製 型式 W-357-1MPD)



図6 超音波振動体洗浄装置での洗浄の様子

図7に超音波洗浄装置の出力に対する PSL 粒子の除去

率を示す。超音波を付加していない出力 0W の時、除去率はどれも低く PSL 粒子は全く除去されていなかった。超音波の出力 10W 以降では、バーク温度 90℃の場合は出力によらず除去率 90%以上で、出力の上昇に対して除去率はわずかに上昇した。バーク温度 100℃の場合は、10W で 47%、20W で 85%、30W 以上だと約 100%になった。バーク温度 110℃の場合は、出力によらず除去率は 10%未満で出力 20W の時のみ 10%を超えた。

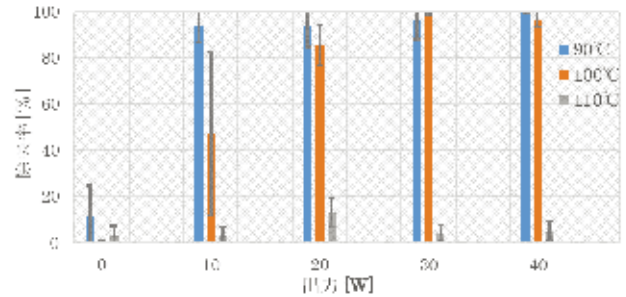


図7 超音波洗浄装置の出力に対する PSL 粒子の除去率  
③考察

計算から得られた除去力と実験結果の 100℃の時の除去率を比較した結果を図8に示す。除去力の確認は超音波振動体洗浄装置の出力が 30W の時とした。除去率は算出した除去力と同じような上昇傾向であった。これは、超音波洗浄機の出力によって超音波の振幅が大きくなり、それにより超音波のエネルギーも大きくなった。つまり、エネルギーの増加によって水分子の衝撃圧が高くなり洗浄力が上昇したと考えられる。除去率の上昇傾向は、算出した除去力とほぼ一致した。

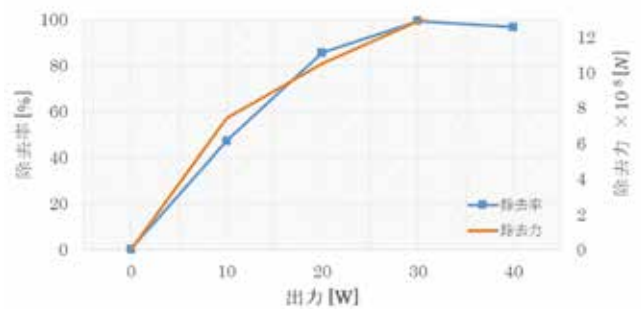


図8 算出した除去力（理論値）と実験値の除去率の比較

## 5. 本研究に関する発表

(1) 岡島圭佑, 長嶋良樹, 丹菊大輝, 森 竜雄, 清家善之: 超音波を用いた半導体デバイス洗浄技術に関する研究, 応用物理学会 界面ナノ電子化学研究会(INE) 第3回ポスター展, (2018).