

論 文

半導体製造工程上の静電気力による付着浮遊微粒子の影響

樋口 弘志*, 前田 宗雄*, 山内 健次*, 高橋 伸夫*

(1989年11月7日受理)

Particle Contamination Caused by Electrostatic Forces
in Semiconductor Manufacturing

H. HIGUCHI,* M. MAEDA,* K. YAMAUCHI* and N. TAKAHASHI*

(Received November 7, 1989)

A presence of particle contamination on silicon wafers is a prime cause of semiconductor ESD damage. The probability of semiconductor ESD damage has not become generally clear, even though there is a significant process evaluation that ESD does, indeed, reduce device yield and lithography mask life in a clean room. This paper describes the effect of particle contamination on silicon wafers in semiconductor manufacturing. In experiments, electrostatic forces were applied experimentally to bipolar schottky TTL 74S04 in the base lithography and emitter diffusion process to study the deposition density and velocity of particle contamination on silicon wafer surfaces, and the deposition motion of particle was observed by the laser light method. The results show that the contaminated semiconductors decrease device yield, breakdown voltage and ESD susceptibility. Finally, the electrostatic control for particle contamination in the clean room is discussed.

1. まえがき

半導体デバイスの静電耐量の低下要因にウェハ製造工程での浮遊微粒子による汚染がある。これらの汚染はシリコン・ウェハに帯電した静電気のクーロン力によってクリーン・ルームに存在している浮遊微粒子の付着が一因であると考えられている。元来、半導体デバイスの製造工程はクリーン・ルームで構築されており、ほこりなどの浮遊微粒子の清浄化や静電気除電などの環境管理は十分になされている。しかしクリーン・ルームへの材料や機器の搬入、作業員の出入りで浮遊微粒子が増える。また工程内の相対湿度は一般に40%以下で管理されているためプラスチック・ポートなどによる移動、スピンドル・リスやドライによるウェハの乾燥などで、ウェハに静電気が帯電しやすくなる。浮遊微粒子の存在は、特に窓開き工程(lithography process)では歩留り低下の要因となるためラミナー・フロー・ルームの中のラミナー・フロー・ベンチで作業することが多い。これは作業面に常に上から下へHEPA(High Efficiency Particulate Air)フィルタを通した清浄空気を送り出す。HEPAフィルタは一般に0.3 μm径以上の浮遊微粒子を99.97%除

去できる。

本研究は、半導体デバイスのウェハ製造工程における静電気のクーロン力による浮遊微粒子の付着の影響を解析するために浮遊微粒子の付着密度と沈着速度それにチップと最終組立て品の歩留りや電気的特性および静電耐量等の関係について調べた。

2. 実験

2.1 実験装置

図1は浮遊微粒子を測定する実験システムの概要を示す。レーザ発振装置で発生したレーザ光線は、オプティカル・ファイバで先端のシリンドリカル・レンズに伝送されレーザ・ビームより帶状のレーザ・ライト・シートとなり、シリコン・ウェハ面に照射される。シリコン・ウェハは直径100 mmのものを用いクリーン・ブースの真下60 cmの金属板上に設置されている。金属板はシリコン・ウェハと同寸で絶縁体で固定されて高圧(+)電源に、一方(-)電源はクリーン・ブースのHEPAフィルタの真下の金属板に接続されている。この両金属板(間隔50 cm)は電極として用いられ、高圧電源 H_V はシリコン・ウェハに電位(または電界)を与える。その値は0~5 kV(電界0~100 V/cm)である。以上はシリコン・ウェハが水平に置かれた場合であるが、垂直に設置された場合は可動できるように設計されている。汚染微粒子としてはポリスチレン・ラテックスを用

キーワード: クリーン・ルーム、浮遊微粒子、静電気力、シリコン・ウェハ、ファラデー・ケージ

* 姫路工業大学 (671-22 兵庫県姫路市書写 2167)

Himeji Institute of Technology, 2167 Shosha,
Himeji, Hyogo, 671-22 Japan

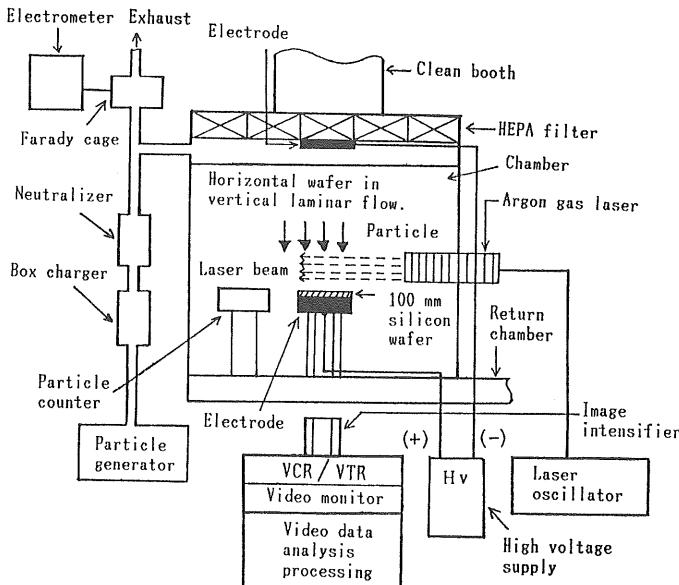


図1 実験システムの概略

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

いてパーティクル・ジェネレータで発生させ、ボクサ・チャージャで -3 kV あるいは中和器で 0 V の状態でチャンバに送り、シリコン・ウェハ上に自然落下させ、一部はファラデー・ケージで電荷量が計測される。落下微粒子の散乱光をイメージ・インテンシファイア(画像増強管)付きのVCRで撮影し²⁾、得られたビデオ画像から画像処理分析装置(video data analysis processing)でシリコン・ウェハに付着した微粒子数と沈着速度を求め、同時にパーティクル・カウンタでシリコン・ウェハ近傍の雰囲気の浮遊微粒子数を計数した。画像処理分析装置はX-Yトラッカとパーソナル・コンピュータから構成されている。チップとデバイスの歩留りはATS(Automatic Test System: HP製)、I-V特性はカーブ・トレーサ(Tektronix製)、そして静電耐量の評価はコンデンサ放電による破壊試験である。図2はその試験回路を示す。静電破壊試験で破壊されたデバイスの解析にはSEM(Scanning Electronic Microscope:日本電子製)を用いた。

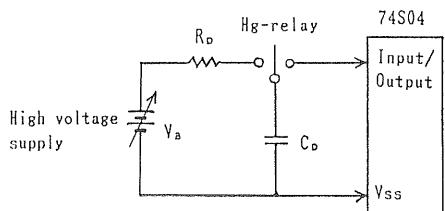


図2 静電破壊試験の基本回路

Fig. 2 Circuit of ESD stress testing.

2.2 実験方法

クリーン・ルーム内に分布した浮遊微粒子がシリコン・ウェハに沈着する可能性は全工程にあるが、ここでは最も静電気帶電に敏感なバイポーラ・ショットキ・プロセスを用いた。実験に用いた試料はバイポーラ・ショットキ・デバイス74S04である。一般にクリーン・ルーム内の製造プロセスにおいてシリコン・ウェハの移動やオペレーションは縦置き(垂直)が多い。しかし窓開き工程やイオン注入/ion implantation), CVD(Chemical Vapor Deposition)等のオペレーションは横置き(水平)である。したがって、クーロン力など特別な力が加わらない場合は浮遊微粒子の沈着は空気の流れとシリコン・ウェハの位置に大きく影響される。ここでは重要な二つの工程に限定し、強制的に静電気をシリコン・ウェハに帯電させて、そのクーロン力で浮遊微粒子を吸着させた。その一つはベース窓開き工程であり、もう一つはエミッタ拡散工程である。実験に用いたクリーン・ブースとチャンバは汚染物である浮遊微粒子が外部に漏れて影響を与えないように特別に作られ、その吹き出し空気の流れの平均値は窓開き工程では 30 cm/s 、拡散工程では 50 cm/s に設定しており、温度むらを少なくするために空気の流れの乱れは5%以内に押えてある。また温度はクリーン・ルーム全体では $20\sim 24^\circ\text{C}$ 、窓開き工程では特に $20\pm 0.5^\circ\text{C}$ に、相対湿度は30~40%であるが窓開き工程ではレジストの乾燥を防ぐため特に40%前後で管理した。ベース窓開き工程とエミッタ拡散工程の二つ

表 1 シリコン・ウェハへの帯電の組合せ

Table 1 The matrix of silicon wafer for charging.

Specimen condition	Matrix of silicon wafer															
	S	Ax	Bx	Cx	Ay	By	Cy	A ₁	B ₁	C ₁	A ₃	B ₃	C ₃	A ₅	B ₅	C ₅
Uncharged particle	○	○	○													
-3 kV Charged particle		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1 kV Charged wafer								○	○	○						
3 kV Charged water											○	○	○			
5 kV Charged wafer		○	○	○								○	○	○		

の工程で、シリコン・ウェハの表面に電位（電位 V : 0~5 kV, 電界 E : 0~100 V/cm）を与えると、帯電と中和状態の浮遊微粒子をシリコン・ウェハ表面に沈着させ付着数と沈着速度を測定した。表 1 は実験におけるシリコン・ウェハと浮遊微粒子の帯電条件の組み合わせを示す。ここで S は通常の標準工程、他は条件つきである。組合せは浮遊微粒子の径 ($A=0.3$, $B=1.0$, $C=3.0 \mu\text{m}$) に対する浮遊微粒子の帯電状態 ($\text{添字 } X=0, Y=-3 \text{ kV}$) とシリコン・ウェハの帯電状態 ($\text{添字 } 1=1, 3=3, 5=5 \text{ kV}$) である。なお、シリコン・ウェハ近傍および表面での浮遊微粒子の挙動と沈着の様子はレーザ光線による可視化方法で測定した。このような条件下で製造された 74S04 のチップはプローブ・テストされ、そして組み立てられた後ファイナル・テストされて完成品となる。この完成品はカーブ・トレーサで I-V 特性を測定し、静電破壊試験機で静電耐量を評価した。なお、静電破壊試験で破壊された 74S04 の破壊の原因解明には SEM で観察した。

3. 実験結果と考察

3.1 浮遊微粒子の沈着速度と付着密度

図 1 のレーザ光線の可視化方法により得られたビデオ画像は画像処理され付着した浮遊微粒子数が計測され、これより沈着速度 U_p が次式から求められる⁸⁾。

$$U_p(V_q, V_w) = n S_w N_p \quad (1)$$

ここで、 V_q と V_w はそれぞれ浮遊微粒子とシリコン・ウェハ表面の帯電状態、 N_p は霧囲気の浮遊微粒子濃度、 n は付着した浮遊微粒子数、 S_w は測定面積、 t は測定時間である。実験では径 $D_w=100 \text{ mm}$ のシリコン・ウェハを利用し、その面積 $S_w=78.5 \text{ cm}^2$ で、 t は約 180 秒である。

図 3(a) はベース窓開き工程、(b) はエミッタ拡散工程に

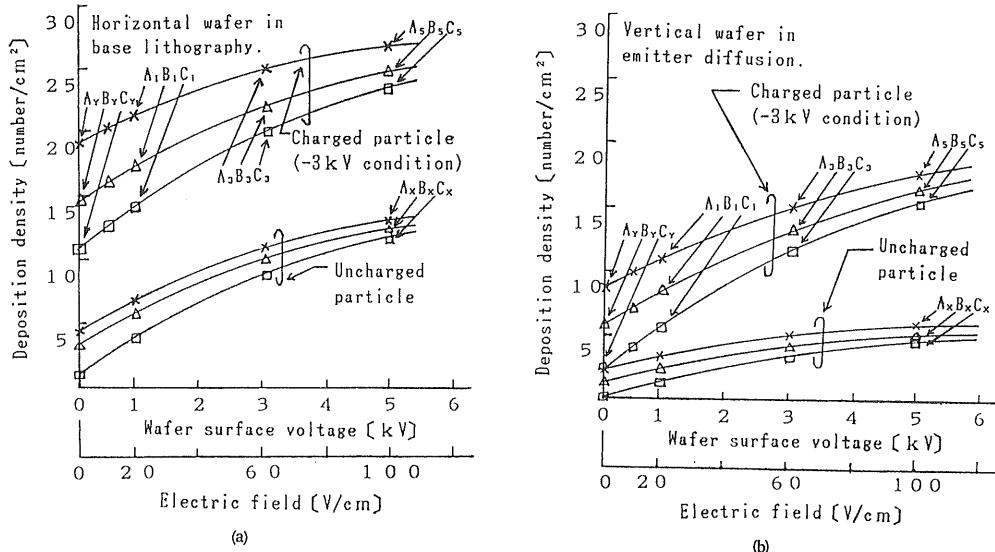


図 3 ウェハ表面電位と浮遊微粒子の付着密度との関係

(a) ベース窓開き工程に適用した場合 (b) エミッタ拡散工程に適用した場合

Fig. 3 Relation between wafer surface voltage and deposition density.

(a) Deposition density (Base lithography) (b) Deposition density (Emitter diffusion)

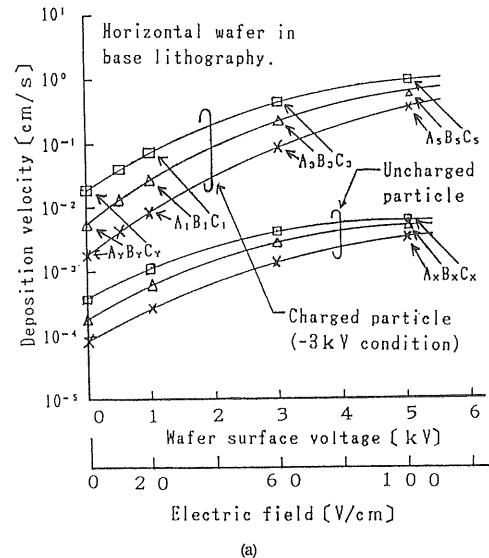
におけるシリコン・ウェハの表面電位と付着した浮遊微粒子数の濃度の関係を表す。ベース窓開き工程のシリコン・ウェハの配置は実際の工程と同じ水平置きであるため付着するシリコン・ウェハの面積がエミッタ拡散工程の縦置きよりも大きく、ウェハ近傍の浮遊微粒子濃度も多い、両工程とも径の小さい浮遊微粒子ほど付着数が多かった。

図4(a)はベース窓開き工程、(b)はエミッタ拡散工程におけるシリコン・ウェハの表面電位と浮遊微粒子の沈着速度の関係を表す。沈着速度は浮遊微粒子の沈着しやすさをプロットしたものである。図4(a)のベース窓開き工程の実験結果から5kVに帶電したシリコン・ウェハの表面に帶電していない浮遊微粒子が沈着した場合の沈着速度は $U_p(0V, 5kV) = 5 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ である。また浮遊微粒子が-3kVの帶電状態でシリコン・ウェハが帶電していない場合は $U_p(-3kV, 0V) = 2 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ である。しかし表面電位を1から5kVに帶電させると沈着速度は $U_p(-3kV, 1 \sim 5kV) = 8.5 \times 10^{-3} \sim 1.0 \text{ cm/s}$ と大きく変化している。この結果から沈着速度はシリコン・ウェハの帶電と浮遊微粒子の帶電状態および浮遊微粒子の径によって異なる。したがって、図4(a)のベース窓開き工程と(b)のエミッタ拡散工程の実験から次の結果が得られた。

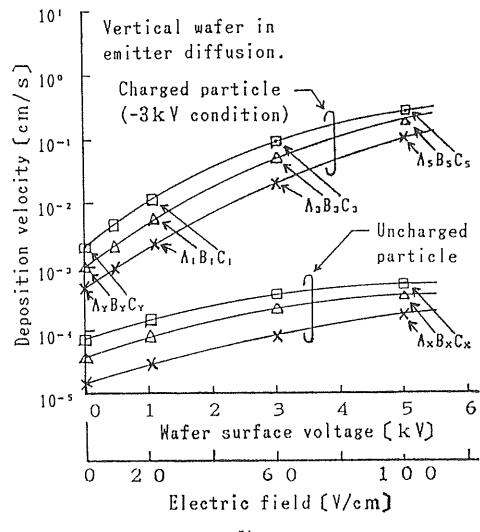
(1) シリコン・ウェハが帶電していない場合は沈着速度のばらつきが大きかった。この原因は浮遊微粒子の径によって重力、慣性力、拡散力が影響を与えるためである。表2に浮遊微粒子の大きさと力学的特性値の関係を参考として示す⁴⁾。

(2) シリコン・ウェハの表面電位を大きくした場合は沈着速度のばらつきは小さかった。これは明らかに重力、慣性力、拡散力に比べてクーロン力が大きく働き、径による影響は小さいと考えられる。ただし、若干の差は径によって帶電量が異なるためである。ここで-3kVで帶電状態にした浮遊微粒子の電荷をファラデー・ケージで測定すると 4.8×10^{-18} ($0.3 \mu\text{m}$) $\sim 6.6 \times 10^{-16}$ ($3.0 \mu\text{m}$) Cであった。図1の実験装置を用いて同じように-3kVで帶電した浮遊微粒子の電荷を計算すると 2.9×10^{-18} ($0.3 \mu\text{m}$) $\sim 2.6 \times 10^{-16}$ ($3.0 \mu\text{m}$) Cであり、ほぼ同じような結果がえられた。誤差は測定方法などの条件の違いと考えられる。なお、詳しい計算式は付録を参照のこと。

(3) ベース窓開き工程(ウェハの水平配置)とエミッタ拡散工程(ウェハの垂直配置)の沈着速度を比べるとベース窓開き工程が明らかに速く、これはウェハの配置によってクーロン力や重力などの要因が影響すると考えられる。



(a)



(b)

図4 ウエハ表面電位と浮遊微粒子の沈着速度との関係

(a) ベース窓開き工程に適用した場合

(b) エミッタ拡散工程に適用した場合

Fig. 4 Relation between wafer surface voltage and deposition velocity.

(a) Deposition velocity (Base lithography)

(b) Deposition velocity (Emitter diffusion)

井上ら³⁾の実験結果では径 $0.3 \mu\text{m}$ の微粒子でシリコン・ウェハ表面電位を0から4kVまで変化させた場合に、沈着速度は $10^{-4} \sim 3.0 \text{ cm/s}$ 、そしてDonovanら⁵⁾は径 $0.6 \mu\text{m}$ の微粒子でシリコン・ウェハ表面電位を0から5kVまで変化させた場合に、沈着速度は $0.1 \sim 0.9 \text{ cm/s}$ まで変化すると報告している。これらの差違は微

表 2 微粒子の動力学的特性
Table 2 Kinematic properties of particle.

Particle diameter (μm)	Mass (g)	Deposition velocity by weight (cm/s)	Relaxation time (s)	Brown's diffusion factor (cm ² /s)
0.1	5.24×10^{-16}	9.55×10^{-5}	9.75×10^{-8}	7.52×10^{-6}
0.2	4.19×10^{-15}	9.25×10^{-4}	2.30×10^{-7}	2.22×10^{-6}
1.0	5.24×10^{-13}	1.37×10^{-3}	1.40×10^{-6}	2.81×10^{-7}
2.0	4.19×10^{-12}	4.98×10^{-2}	5.09×10^{-5}	1.58×10^{-7}
10.0	5.24×10^{-10}	3.00×10^{-1}	3.07×10^{-4}	2.37×10^{-8}

粒子の物理定数や帶電状態、測定条件等の違いによると考えられる。また Liu ら⁶は静電気力と重力とブラウン運動による拡散が同時に微粒子に作用する場合をスルペ・コンピュータで計算して発表している。

3.2 汚染チップとデバイスの歩留り

図 5 はチップの完成後のマルチ・プローブ・テスト(直流電気特性試験)で、汚染されたチップは全体的に歩留りが低く、特にベース窓開き工程のウェハが顕著である。図 6(a)と(b)は組立て完成後のファイナル・テスト(直流電気特性試験)の歩留りを示す。ただし正常な 74S04 の歩留りとの相対的な値である。ファイナル・テストでは同じテストを三度繰り返しても、汚染されたデバイスは故障の収束性がなかった。これはファイナル・テストでは組立て工程を経ているためデバイスに熱の履歴が加わり、そのためチップに付着した浮遊微粒子がイオン化して故障が収束しなかったと考えられる。いずれのテストでも故障の大部分は耐圧劣化とそれに伴うリーケージの発生であった。また先の実験では表面に帶電したシリコン・ウェハほど付着した浮遊微粒子量が多かつたが、ここでは径の大きい付着した浮遊微粒子ほど歩留りの低下が見られた。したがって故障の原因は付着した

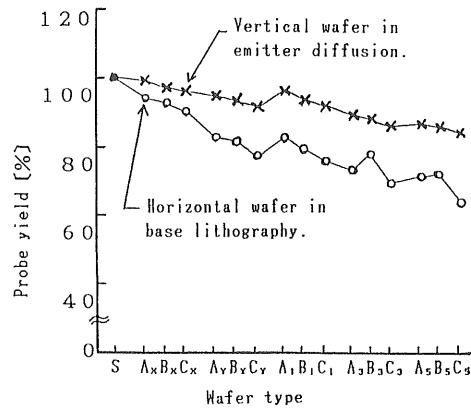


図 5 74S04 のプローブ歩留り

Fig. 5 Probe yield of 74S04.

浮遊微粒子量よりも径の大きさに左右される。このようにシリコン・ウェハ工程における汚染の大半は、付着浮遊微粒子が原因であると考えられ、これがシリコン・ウェハ・コンピュータで計算している。

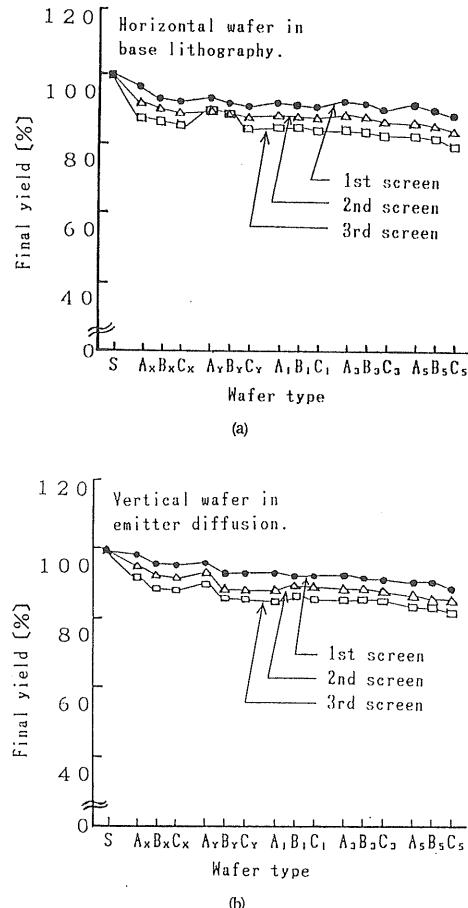


図 6 74S04 のファイナル歩留り

- (a) ベース窓開き工程に適用した場合
- (b) エミッタ拡散工程に適用した場合

Fig. 6 Final yield of 74S04.

- (a) Final yield (Base lithography)
- (b) Final yield (Emitter diffusion)

エハの表面に沈着し欠陥となる。この欠陥は耐圧劣化を招き歩留りに大きく影響し、静電耐量の低下の原因の一つである。シリコン・ウェハ製造工程における欠陥レベルを仮定すれば、それに対するおよその歩留りの予測が可能である⁷⁾。これを統計学的に予測する方法が今日多くの研究者から発表されている。図7(a)はマルチ・プローブ・テストで不良となったチップのカープ・トレーサによる入力のI-V曲線で、(b)の正常なチップの6.0Vと比べて耐圧が低く、5.5V付近でブレークダウンが発生し異常特性となっている。

3.3 静電耐量の評価試験と故障デバイスのSEM解析

図8(a)と(b)はコンデンサ放電法(容量 $C_D=10\sim 1000\text{ pF}$)による静電耐量の評価結果である。正常品は参考のため正と負、汚染されたデバイスには正電圧を印加した。正電圧印加は逆方向バイアス印加であるため雪崩降伏と二次降伏特性をもっており、チップの汚染や欠陥に影響されやすい。そのため一般に負電圧よりも低い

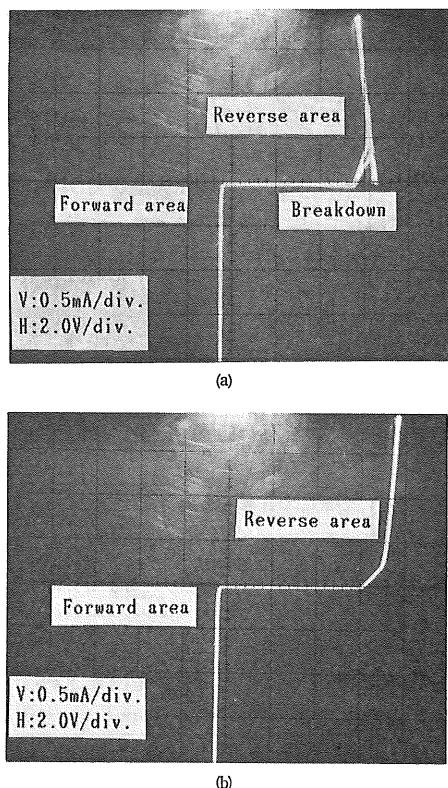


図7 カープトレーサによる74S04のI-V特性

- (a) 故障品の場合
- (b) 正常品の場合

Fig. 7 I-V characteristics of 74S04 observed by curve-tracer.

- (a) Damaged sample
- (b) Normal sample

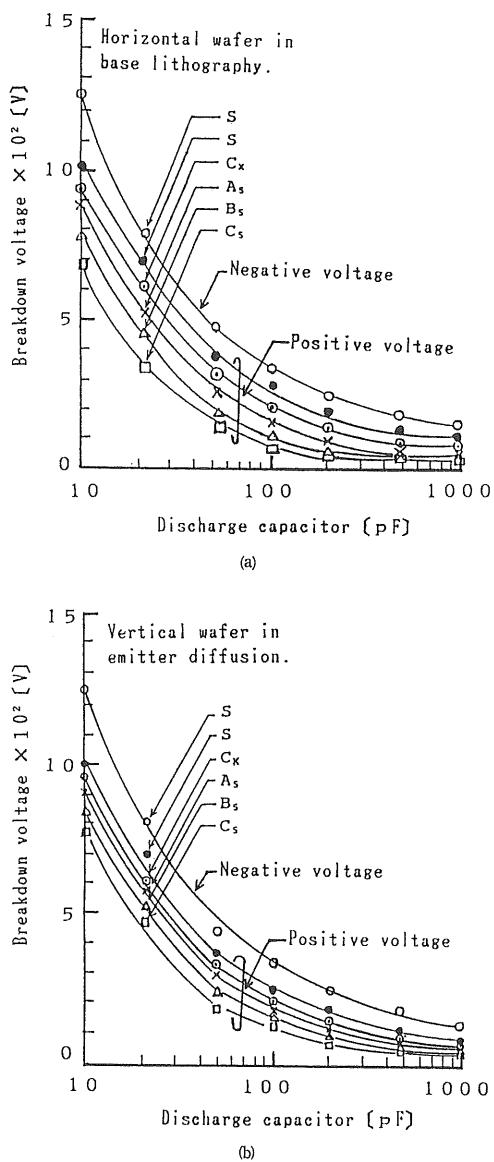


図8 74S04の静電耐量

- (a) ベース窓開き工程に適用した場合
- (b) エミッタ拡散工程に適用した場合

Fig. 8 ESD stress testing of 74S04.

- (a) ESD susceptibility (Base lithography)
- (b) ESD susceptibility (Emitter diffusion)

正電圧で破壊される⁸⁾。このときの破壊エネルギー E_D は破壊電圧を V_B とすると次式で与えられる。

$$E_D = (1/2) C_D V_B^2 \quad (2)$$

標準品 S の正の静電耐量は放電容量 $C_D=100\text{ pF}$ のとき 300V であり、(2)式より破壊エネルギーを求める $E_D=4.5 \times 10^{-6}\text{ J}$ である。ベース窓開き工程で帶電状態(5kV)のシリコン・ウェハに付着した帶電浮遊微粒子

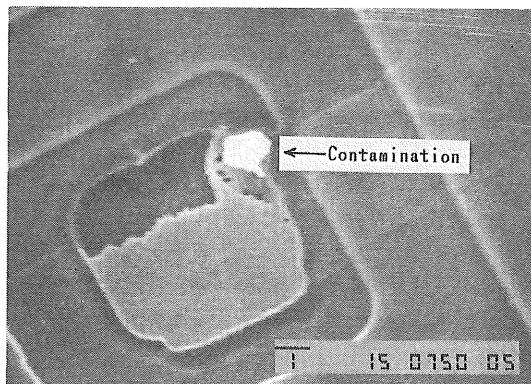


図 9 74S04 の SEM の解析写真

Fig. 9 SEM analysis picture of 74S04.

(径 $3.0 \mu\text{m}$) による汚染デバイス C_5 の静電耐量は 80 V , 破壊エネルギーは $E_D = 3.2 \times 10^{-7} \text{ J}$ であり, 標準品と比べて電圧で 73.3% , エネルギーで 93% の低下が見られた。図 9 は図 8 の実験で破壊されたデバイス 74S04 を解析した SEM の写真である。入力のトランジスタのエミッタに付着浮遊微粒子の存在が見られる。この実験結果から, 強制的に浮遊微粒子を付着したシリコン・ウェハは明らかに静電耐量が低い。先に筆者らはバイポーラ・ショットキ・デバイス 74S04 の静電耐量について報告した⁹⁾。これによると破壊電圧は $C_D = 100 \text{ pF}$ で 300 V 前後で, 今回の汚染された全デバイスはこれよりもさらに低いので浮遊微粒子による影響は明らかである。

4. あとがき

半導体デバイスの静電耐量の劣化を解明するためにバイポーラ・ショットキ論理デバイス 74S04 のウェハ製造工程で, 人工的にシリコン・ウェハ表面に静電気のクーロン力で浮遊微粒子を付着させ, そのときの沈着速度と付着数を測定し, チップとデバイスの歩留り, 耐圧, そして静電耐量等に与える影響を評価した。そして, 次の結果を得た。

(1) $1 \sim 5 \text{ kV}$ に帯電したシリコン・ウェハ (ベース窓開き工程) は, そのクーロン力によって帶電浮遊微粒子 (径 $0.3, 1.0, 3.0 \mu\text{m}$) を $17 \sim 27 \text{ 個}/\text{cm}^2$ の濃度で付着させる。

(2) $1 \sim 5 \text{ kV}$ に帯電したシリコン・ウェハ (ベース窓開き工程) は, そのクーロン力によって帶電浮遊微粒子 (径 $0.3, 1.0, 3.0 \mu\text{m}$) を $8.5 \times 10^{-8} \sim 1.0 \text{ cm/s}$ の速度で沈着させる。

(3) 3 kV 付近以下で帯電したシリコン・ウェハでは, 垂直配置 (エミッタ拡散工程) よりも水平配置 (ベース窓開き工程) が帶電浮遊微粒子の沈着速度が大きく, 付

着浮遊微粒子数も多い。 3 kV 以上ではこの差が小さくなる。

(4) シリコン・ウェハに沈着した帶電浮遊微粒子は径 $3.0 \mu\text{m}$ が $1.0 \mu\text{m}$ や $0.3 \mu\text{m}$ よりも歩留り, 耐圧, そして静電耐量に大きく影響する。

(5) 帯電 (5 kV) したシリコン・ウェハ (ベース窓開き工程) に沈着した帶電浮遊微粒子 (径 $3.0 \mu\text{m}$) による汚染デバイス C_5 は正常品 S と比べて相対的にプローブ歩留りは 38% , ファイナル歩留りは 20% , そしてトータルの歩留りでは 50.4% も低かった。同じように耐圧は 9% , 静電耐量では 73.3% の低下が見られた。

以上により, クリーン・ルーム内の静電気除去の対策は結果的にウェハへの汚染の対策の一方法であり半導体デバイスの品質と信頼性向上のために極めて重要であるとの評価を得た。

参考文献

- 1) S. Murakami, S. Kato and S. Chirifu : J. Flow Visualization Soc. Jpn., 5 (1985) 229
- 2) I. Hayakawa, S. Fuji and K.Y. Kim : Aerosol Sci. Technol., 7 (1987) 47
- 3) 井上正憲, 池鯉鮎悟, 阪田総一郎, 吉田隆紀, 岡田孝夫: 信学技報, R88-15 (1988) 19
- 4) 高橋幹二: 基礎エアゾル工学, p. 15, 養賢堂 (1972)
- 5) R.P. Donovan, A.C. Clayton and D.S. Ensor : Proceedings of 33rd Annual Technical Meeting of International Environment Sciences, p. 473 (1987)
- 6) B.Y.H. Liu, B. Fardi and K.H. Ahn : Proceedings of 33rd Annual Technical Meeting of International Environment Sciences, p. 461 (1987)
- 7) 早川一也編: クリーン・ルーム, p. 226, 井上書院 (1968)
- 8) 樋口弘志, 前田宗雄, 山内健次, 高橋伸夫: 静電気学会誌, 13 (1989) 431
- 9) 樋口弘志, 大西一巧: 電子情報通信学会講演論文集 '87, No. 2, p. 6 (1987)

付録

帶電微粒子の電荷の計算値:

本実験で用いた -3 kV で帶電状態にした浮遊微粒子の電荷 q_p は以下の方法で求めることができた。大きさ $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ (距離 100 mm) の平行な 2 枚の垂直金属板間に -3 kV の電圧を印加してほぼ一様な電界をつくり, 電界による浮遊微粒子の終端移動速度を図 1 の実験システムを利用して求め, 次式で計算した。

$$q_p = 3\pi\mu D_p U_p / C_c E_p$$

ここで, μ : 空気の粘性係数 ($1.71 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)

$$D_p: \text{微粒子の直径} \quad D_{p0.3} = 0.3 \mu\text{m}$$

$$D_{p3.0} = 3.0 \mu\text{m}$$

$$U_p: \text{終端速度 実験値} \quad U_{p0.3} = 0.5 \text{ cm/s}$$

$$U_{p3.0} = 1.6 \text{ cm/s}$$

C_c : Cunningham's correction factor

$$q_{0.3} = 3 \times 3.14 \times 1.71 \times 10^{-5} \times 0.3 \times 10^{-6} \times 0.5$$

$$C_{c0.3} = 2.76$$

$$\times 10^{-2} / 2.76 \times 3 \times 10^4 = 2.9 \times 10^{-18} \text{ C}$$

$$C_{c3.0} = 1.00$$

である。次に $D_p = 3.0 \mu\text{m}$ について求めると $q_{3.0} = 2.6 \times 10^{-16} \text{ C}$ となる。

E_p : 電界 (30 V/mm)

$D_p = 0.3 \mu\text{m}$ について求めると