

第20回 半導体の生産現場を訪ねて① —クリーンルーム—

厚木エレクトロニクス 代表
サクセス インターナショナル 取締役
加藤俊夫

半導体の生産には超クリーンな部屋が必要なのはご存知かと思います。また、Si単結晶は、99.9999999%のイレブン・ナインの超高純度となっています。なぜこんな高純度が必要なのでしょう。

半導体製造では、結晶中の不純物や表面に載っているダストの種類によって、悪さの仕方が異なります。ここでは代表的な例を挙げてみます。

何故クリーンが必要なのか

1. 金属原子がトラップの原因に

CuやAuなどの金属原子が結晶中に入っていると、電子や正孔の再結合中心を形成します。図1は電子の動きを表していますが、CuやAuの原子があるとそこに寄り道する（トラップと呼んでいます）ので、上手く電流が流れません。逆に、そこから電子が湧き出ることもあり、イメージセンサなどでは真っ暗な場面でも、わずかに暗電流が発生して偽信号となり、真っ暗ではなくなってしまいます。従って、このような電子のトラップとなる金属原子は極力減らしたいわけです。

2. 有機物のダストが欠陥の原因に

有機物のダストなどが乗っていると、フォトリソグラフィでパターンを形成する時にダストのパターンが写ってしまいそのチップは不良品となります。この様子を図2に示します。CVDやスパッタの膜付けの欠陥ともなりますし、イオン注入ではダストが陰になってその部分に注入されません。

3. 極薄の有機物でもCVDを阻害

表面にうっすら付着した有機物も問題です。CVDの膜付けは、表面現象を利用していますので、下地の表面の様子でCVDの条件が異なってしまいます。時には、原

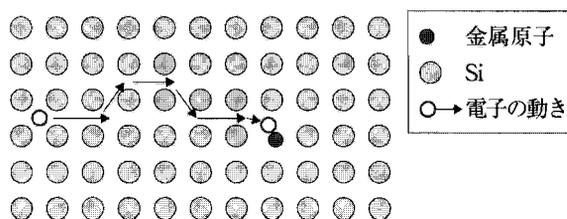
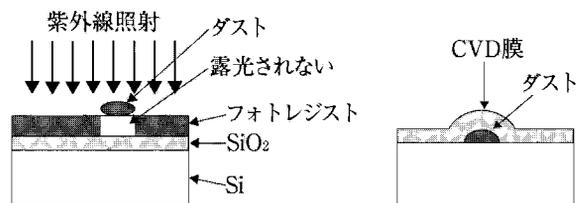


図1 電子が金属原子にトラップされる様子



フォトレジスト工程でのダストは問題になることが多い。図はダストの影で一部が露光されない場合

ダストの上のCVD膜は後工程で剥離する恐れが強い

図2 フォトレジスト工程やCVD工程でのダストの影響

子1層の膜が付着しているだけでもCVDを阻害する場合があります。ウェーハを保管しておく樹脂容器などの壁から僅かに発生する有機物が問題になることもあります。

クリーンルームに入りましょう

人体はダスト発生源です。いくら毎日お風呂に入って

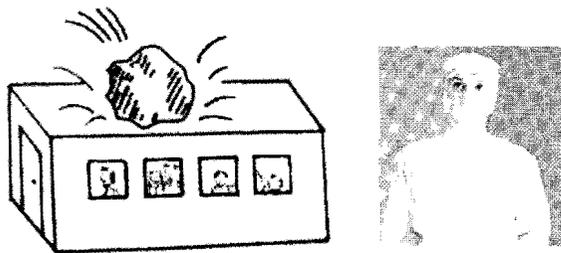


図3 1 μmのダストはトランジスタには巨石

表1 STI工程

1. 洗浄	7. レジスト剥離
2. 熱酸化 (SiO ₂ 膜の生成)	8. 熱酸化 (SiO ₂ 膜生成)
3. SiN膜CVD	9. poly-Si CVD
4. フォトプロセス	10. CMP (poly-Si削る)
5. 検査	11. 検査
6. エッチング	12. 洗浄

せん。洗濯も通常の水で洗ってはダストが大量に付着しますから、ダストフリーの洗濯をする専門の業者があります。さて、そうやって完全武装した後、入ったクリーンルームはどんな構造になっているのでしょうか。

クリーンルームの構造

LSIの大量生産のラインでは、一般にベイ方式と呼ばれるクリーンルームが用いられます。図4にベイ方式の見取り図を示します。フォトリソグラフィプロセス、CVD、エッチングなどの装置群がそれぞれの部屋に駐車場の車のように整列しています。特に、DRAMやフラッシュメモリなどの少品種多量生産の場合は、同じ装置が数十台も整列していますので壮観です。ロジック系の生産は、多品種少量生産が多いので、異なる装置が並んでおり、メモリライン程には整然としていないようです。

ベイ方式では同種の装置が1か所にありますので、1台が故障しても隣の装置で作業ができますから、装置稼働率は良いわけで、メンテナンスも容易です。ただし、作業順に並んでいるわけではありませんから、ウェーハを部屋から部屋へ搬送しなければなりません。一例として、STI (Shallow Trench Isolation) 工程を見ますと、表1のような作業フローとなります。この場合の部屋の移動は、洗浄室→熱酸化室→CVD室→フォトリソグラフィ室→検査室→エッチング室→レジスト剥離室→熱酸化室→CVD室→CMP室→検査室と、一つの工程で11回も移動しなければなりません。この間、ストックに一時保管されている場合もありますから、移動回数はもっと多いわけです。ウェーハを投入して完成するまでには、数キロメートルも移動すると言われています。

では、ベイ方式ではなく、工程順に装置を並べれば移

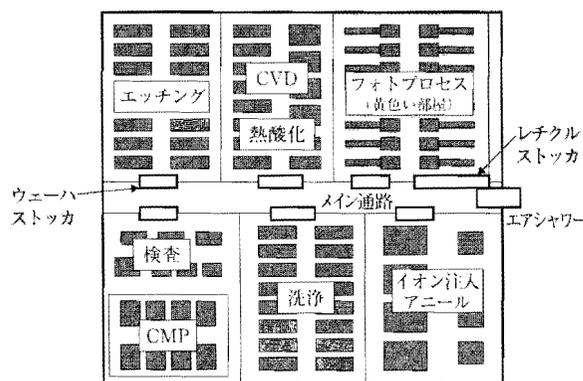


図4 ベイ方式クリーンルームレイアウトの一例

綺麗にしていますと言っても、着ている服からダストが出ます。さらに、呼吸をするだけでも口からダストが出てきます。そこで、図3のような特別に作られたクリーンスーツ、帽子、手袋、靴を着用し、マスクで口を塞ぐことが必要です。クリーンルームで喋ると大変な水滴(唾)が飛び散りますし、くしゃみをした時のデータを見たことがあります。数メートル四方に唾が大量に飛んでいます。従って、マスクが特に重要です。

次に、クリーンルームに入るにはエアシャワーを通ります。左右からクリーンエアが吹き出る構造になっており、厳重なクリーンを要求する場合は、数メートルもクリーンエア中を歩く場合もあります。エアは30秒間ぐらい吹き出していますから、その間なるべく体を動かしてスーツに付着しているダストを落とすようにします。クリーンスーツや手袋、靴は、クリーンルーム専用で作られたもので、ダストが出ない材質で、縫い目などもありま

<ちょっと脱線>

我が家には女性が2人いますが、洗面台に並んでいるお化粧のビンの数は30個ほどもある。どんなご利益があるのか。水や牛乳に入れ替えておいても分からないだろう。などと言うと、コテンパンに怒られるので、決してそんなことは言いません。しかし、半導体屋から見るとお化粧はゴミを塗っているわけで、クリーンルームに入るにはお化粧禁止です。命より大切なお化粧を禁止するなんて、人権侵害と言われても...



動距離は少なくて済みますね。ただし、この場合は装置の大きさがバラバラですからうまく収まらず床面積が多くなり、ステップのような精密機械の横に熱処理の装置を配置するのは熱遮蔽が面倒です。また、工程変更やプロセスの異なるデバイスを生産するのが困難で柔軟性に欠けます。そのようなわけで、工程順レイアウトを採用している工場はほとんどないと思われま

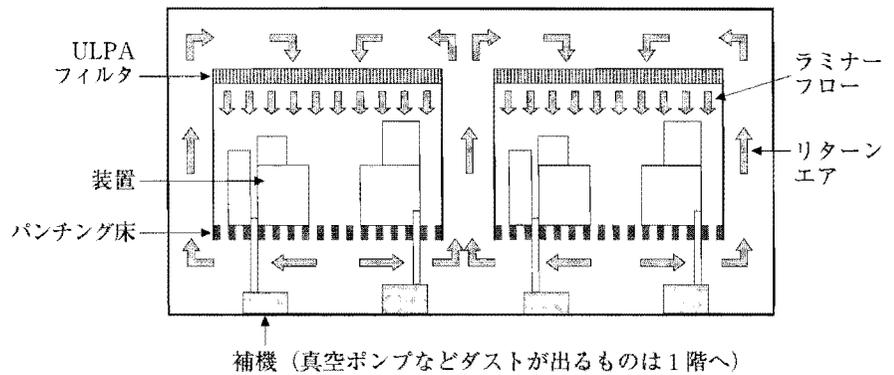


図5 クリーンルームの構造とエアの流れ

次にクリーンルームの風の流

れを見てみましょう。図5のように3階建てになっている場合が多く、2階に装置があり、3階からフィルタを通ったクリーンエアが吹き出していきます。フィルタには、FFU (Fan Filter Unit) と呼ばれる扇風機付のフィルタが用いられ、 $0.1\mu\text{m}$ のダストが99.999%捕捉できるULPAフィルタ (Ultra Low Particle Air Filter) が使われています。

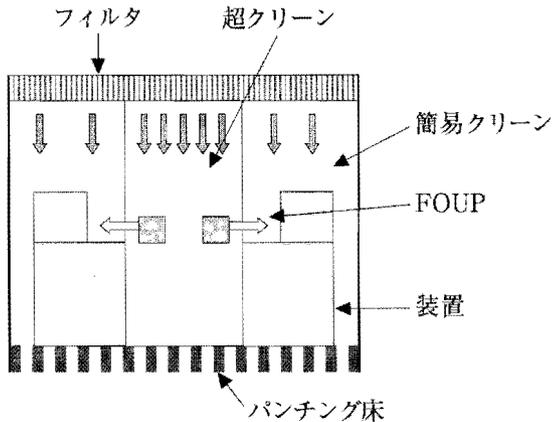
空気の流れは上から下への層流 (Laminar Flow と呼んでいます) で、床のパンチングから1階へ吸い込まれます。床下に吸い込まれた空気は、まだ、かなりクリーンですから、これを逃がさないように3階へリターンして循環させます。循環によってクリーン度はますます良くなりなす。空気の流速は、 $1\sim 2\text{m/sec}$ 程度で、これより早いとクリーン度の点では良いのですが、中で作業する人は寒く感じます。室温は $22\sim 23^\circ\text{C}$ に制御されてい

ます。このようにダストフリーで温調された空気は、費用が掛かっていますので、逃がしたくないのですが、洗浄装置など薬液の蒸気が発生する場合はダクトで室外へ逃がす必要があります。費用が掛かった空気の損失となりますので、これをいかに減らすかも重要な管理ポイントです。

また、クリーンルーム内では、多くの薬液やガスを用いますので、これらが循環しないようにフィルタには化学物質を取り除くケミカルフィルタが設けられています。アンモニアなどはフォトリソグラフィのパターンに影響すると言われており、取り除く必要があります。

床は空気が流れるようにパンチングされ開口率が大きい方が流れが良いが、最近では重量の大きい装置があり、ヤワな構造では駄目で、微細加工の装置には微振動対策も重要で、かなりの技術が要求されます。

クリーンルームの運転には、かなりの電力が必要です。



ウェーハが移動する空間だけを超クリーンにし、それ以外の所はクリーン度を落とす

表2 ダストレベルと呼称

米国連邦規格 (209D) 1Ft ³ 中の0.5μm		JIS 1m ³ 中の0.1μm	
1個	クラス1	1個	クラス0
10	10	10	1
100	100	100	2
1000	1000	1000	3
10 ⁴	1万	10 ⁴	4
10 ⁵	10万	10 ⁵	5

図6 局所クリーン化

そこで、ウェーハが曝露される最も重要な空間だけを超クリーンにし、それ以外はクリーン度を落とした構造の局所クリーンと呼ばれる方式が用いられる例が増えていきます。ミニエンバイロメント (Mini Environment) と呼ばれることもあり、この様子を図6に示します。

ウェーハはFOUP (Front Opening Unified Pod) と呼ばれる容器で搬送され、密閉したまま装置内へ搬入されますから、原理的にはクリーンルームが要らないとも言えます。実際には100%密閉中のオペレーションは難しいので、局所的にクリーンにしています。

クリーン度の呼称について表2に示しました。元々、米軍の規格が用いられ、1立方フィート中の0.5μmサイズのダストで規定されていました。最近の微細加工の時代には対応できなくなって、いくつかの規格が発表されていますが、表2右欄のJIS規格が一般的かと思われます。最先端LSIの生産にはクラス0または1が必要です。

ウェーハの搬送

一つの工程が終わると、ウェーハはストックに一時保管されます。次の工程へは手で運んでいる工場もありますが、最近の大量産工場では自動搬送が一般的です。搬送には、天井に設けたモノレールを利用し、所定の装置の上から下ろして装置内へ自動的に挿入されるFOUPが用いられる場合が多いようです。これをOHT (Over Head Transfer) と呼んでいます。床にレールを引いた

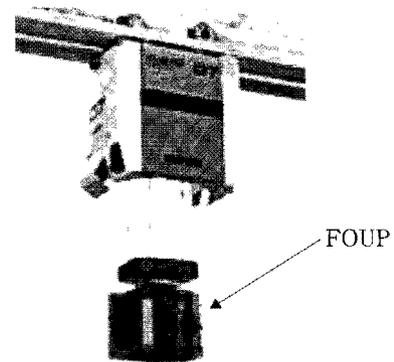


図7 天井搬送モノレールシステム 出所) ダイフクのHP

AGV (Automated Guided Vehicle) と呼ばれる電車を利用する場合もあります。図7は天井搬送の例で、台車への給電は無接触給電システムを採用し、最高150m/分の高速搬送、無停止での合流・分岐が可能です。FOUPはウェーハが入っている密閉容器ですが、装置の前で前蓋を開けるときにダストが入ってはいけません。導入初期の頃はダストフリーで蓋を開けるのに苦労したようですが、現在は問題なく、一般的に使われています。

以上、今月は大量生産ラインのクリーンルームについて勉強しました。半導体の工場は必ずしも大量生産工場とは限りませんから、それぞれの製品に都合の良いようなクリーンルームを作るべきです。TAT (Turn Around Time: 投入から完成までの期間) を短くするのを売り物にした工場もあります。その場合は、ウェーハ25枚が1ロットではなく、1枚が1ロットなどと言う多品種少量の流し方のところもあるようです。

来月から、歩留り、品質、TATなど、半導体工場でのどのような努力が行われているか見て行きましょう。