

半導体製造装置と周辺設備の動向

Trend of the Equipments and Facilities for Semiconductor Manufacturing

柴田昭太郎* Shōtarō Shibata

ICの集積度は年2倍のスピードで向上してきたが、この中で最近、微細加工技術による寄与度は67%といわれている。そこで、微細パターン形成装置、接合形成装置、加工装置及び膜形成装置について、現状と最近発表されている新しい技術による装置の方向づけを示した。

また従来は、縁の下の力持ち的存在であったクリーンルームについても、主要製造設備であるという認識の立場から、対象とする製品に適したクリーンルームの清浄度、超純水の水質、廃水処理などについて述べる。

1 緒言

1948年に、トランジスタがアメリカのベル研究所で発明されてから、既に35年の歳月が過ぎた。

この間に、IC、LSI、マイクロコンピュータ、VLSIへと急速な技術革新が行なわれてきた。それは高集積化、高機能化、高信頼度化、低コスト化などの実現への努力の歴史でもあった。特に、コストパフォーマンスの高いICを顧客に提供するために、ICメーカーは年2倍の集積度向上の技術にチャレンジし実現してきた。また、ICは装置産業とも言われており、その主体をなす半導体製造装置と周辺設備の現状及び将来について、加工技術を通して考えてみる。

2 半導体製造装置

年2倍の集積度^{*)}向上に対する寄与の技術的内容を図1に示す。同図から、今後は、微細加工技術の寄与度が67%と高率を示していることが分かる。

この微細加工技術に関連する主要な製造装置の動向について述べる。

2.1 微細パターン形成装置

(1) パターンマスク作製装置

現在、パターンマスクは光で作る方法と電子ビームで作る方法とがある。パターンの微細化につれて、要求する加工精度を満足する電子ビーム描画装置が主力になってきている。

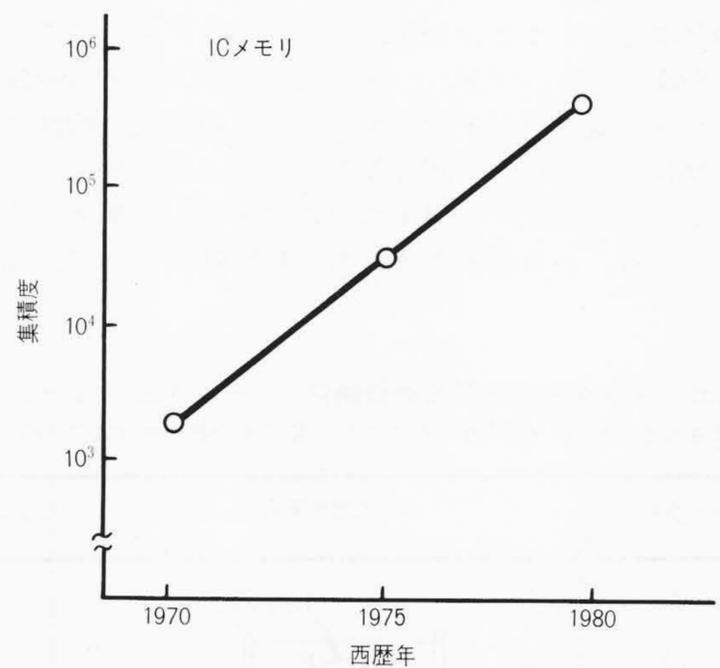
(2) 直接描画装置

電子ビームで直接シリコンウェーハ上に描画する電子ビーム直接描画技術も実用化の域に近づいているが、電子ビーム直接描画装置としては、描画速度と描画面積に改善が望まれる。レーザ光による直接描画可能の情報もあり、注目したい。

(3) 転写装置

現在は、光による転写が主体をなしている。その種類も多く密着形、1:1投影、5:1及び10:1縮小投影形がある。光転写装置では、量産上1 μm 程度が限度と考えられる。VLSIのより微細なパターンには、X線、電子ビーム、イオンビームなどを使う転写技術が研究開発されている。最近になって、試作装置の発表も盛んである。

*) 集積度：1チップ当たりの素子数をいう。



項目 \ 西暦年	1968~1972	1973~1977	1978~1982
微細寸法化	26%	26%	67%
チップ面積大形化	7%	13%	15%
デバイス回路改良	67%	61%	18%
計	100%	100%	100%

図1 IC集積度の推移と増加因子 ICの集積度は年2倍の増加率で、1980年代の集積度向上への寄与度は微細加工技術が67%といわれている。

2.2 接合形成装置

微細パターン化が進むにつれて、深さ方向の構造も微細化してきている。すなわち、浅い接合形成となるので、深さ方向の不純物の制御精度を上げねばならない。従来の熱拡散法では、導入不純物のばらつきが大きい。イオン打込装置は不純物量を電荷量で制御でき、かつ均一性、再現性が良く、 $10^{10} \sim 10^{16}/\text{cm}^2$ と広範囲に導入量を制御できるので、浅い接合形成装置の主流になっている。また、イオン打込後のアニールも従来の電気炉の外に、ビーム(電子やレーザ)によるアニール技術が発表され出しているが、浅い接合形成のためである。浅い接合形成は低温プロセスが望ましい。低温アニールの可能なイオン打込装置の開発が今後の課題となるであろう。

* 日立製作所半導体事業部 工学博士

2.3 エッチング装置

加工精度はエッチング技術で左右される。各エッチングによるエッチ後の断面図を表1に示してあるが、従来のウェット方式よりドライエッチング方式のほうが格段に加工精度の良いことが分かる。更に、同表にエッチング方式及び装置の特長についても示してある。図2にドライエッチング装置の処理能力が加工プロセス精度の微細化するにつれて、低下してゆく様子を示してある。量産上の要求としては、同図の左下の矢印の方向への努力を装置メーカーに切望してやまない。具体的には、加工精度向上、高処理能力及び装置の低価格化であるが、加工精度と装置生産性の同時向上の新装置が望まれる。

一方、VLSIでは、接合が浅くなるので、ドライエッチング装置に一工夫が必要である。現在、装置は、1枚処理装置とバッチ処理装置とがある。加工ばらつきが小さいという理由で、1枚処理装置が多く使われているが、処理能力を上げるには、処理時間を短くする必要がある。それは、エッチングを強力に行なうことになり、デバイスにダメージを与える可能性が高くなる。一方、バッチ装置では、例えば約20枚のウェーハを一度にエッチングするので、20倍長い時間でも1枚当たりになると短い時間となる。このほうがゆっくりエッチングしてゆくの、デバイスへのダメージは極めて少ないと考えられる。いずれの方式でも、VLSI用として、加工ば

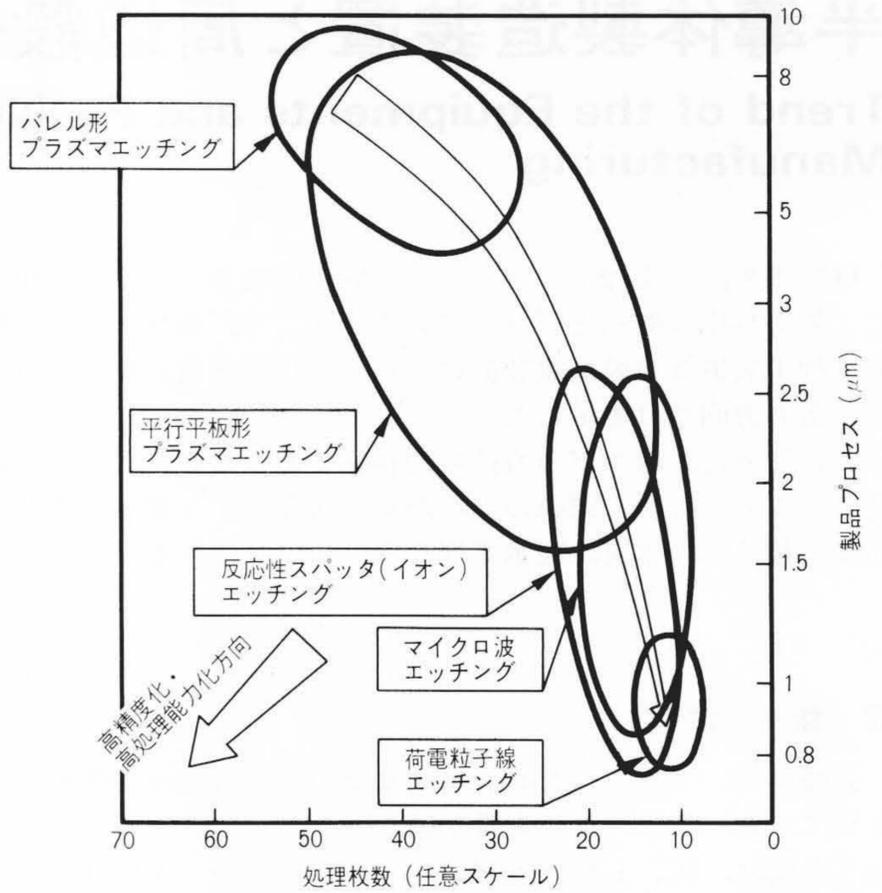


図2 ドライエッチング装置の加工精度と処理能力の関係 微細パターン加工になるにつれて、装置の処理能力は低下してくるのが分かる。改善の方向としては、図の左下の矢印の方向である。

表1 エッチング方式と装置の概略図 ウェットエッチングによるエッチ後の断面図は、ホトレジストが傘をかぶった形であり、反応性ドライエッチングでは傘形をなしていないのが分かる。また、各装置の特長も示してあるが精度、エッチ速度の両方に◎を与えられる装置はまだない。

エッチング方式	装置概略断面図	エッチ後断面図		材料	加工精度	エッチ速度	選択比
		Al	Poly. Si				
ウェット				Si ₃ N ₄ Poly. Si MoSi ₂ SiO ₂ Al	×	◎	大
パレル形プラズマエッチング (バッチ方式)				Si ₃ N ₄ Poly. Si	×	○	大
平行平板形プラズマエッチング (個別処理)				Si ₃ N ₄ Poly. Si MoSi ₂	○	○	大
反応性スパッタ(イオン)エッチング				SiO ₂ Al	◎	△	小
荷電粒子線エッチング (マイクロ波エッチング)				Si ₃ N ₄ Poly. Si MoSi ₂	◎	△	大

らつきが小さく、高処理能力装置の開発が必要である。それには、装置メーカーは、もっとプラズマ物理そのものを研究する必要があると思われる。

2.4 膜形成装置

従来の減圧CVD(Chemical Vapor Deposition)法の外に、光CVD技術に注目しておきたい。

3 今後の半導体製造装置

これからも、VLSIの微細加工に向かって、強力な研究開発が行なわれてゆくことであろうが、1 μ mプロセスデバイスまでは、動作上、製造上、特に本質的な問題はないと考えられるので、年2倍の集積度向上ルールに迷わずチャレンジしてゆくことになる。もちろん、微細加工技術は現在とは、かなり違ったものとなるであろうが、そして新しい半導体装置として、

(1) 装置は小形で一貫ライン化の省人又は無人の方向へ進むことになるであろう。その際、製造プロセスのノウハウが装置に組み込まれてくるようになる。いくらハードウェア的に高精度で高処理能力の装置でも、加工中にデバイスにダメージを与えるようではなんにもならない。VLSIは接合が浅くなるので装置メーカーといえども高度のプロセス技術の理解を必要とする時代になってくる。

(2) 今後の装置はコンピュータが内蔵されるので、コンピュータの特長を生かして、

- (a) 製造中間点での特性モニタによる制御
- (b) 特性データの収集による特性チェック
- (c) 診断プログラムによる装置の迅速な故障診断

などの総合化も必要になるであろう。

4 周辺設備

ICの集積度の向上につれて、純水や作業現場の清浄度の質的要求が厳しくなっている。

4.1 超純水システム

純水の純度も超純水と呼ばれる時代に入ってきた。質的向上の項目として、電気比抵抗、微粒子数、微生物数、有機物などがある。

超純水製造フローの代表例を図3に示す。逆浸透装置によって比抵抗16M Ω ・cmの純水が実現し、更に、コロイダル領域の極小微粒子の除去に限外濾過装置が開発導入されている。現在の超純水の水質レベルは表2に示してあるが、適用製品としては2 μ mデバイスまでと考えられる。

VLSIに対しては表1に示すように、生菌数(個/cc)は、

表2 デバイス別の超純水に要求される水質 VLSI用の数値は推定値である。

デバイス		現 状 (64kDRAM)	VLSI
項 目			
電気比抵抗 (M Ω ・cm)		18 以上	18 以上
微 粒 子	粒 径 (μ m)	0.2以下	0.1以下
	個 数 (個/cc)	70 以下	50 以下
有 機 物 (ppm)		0.2以下	0.1以下
生 菌 数 (個/cc)		0.1以下	0.02以下

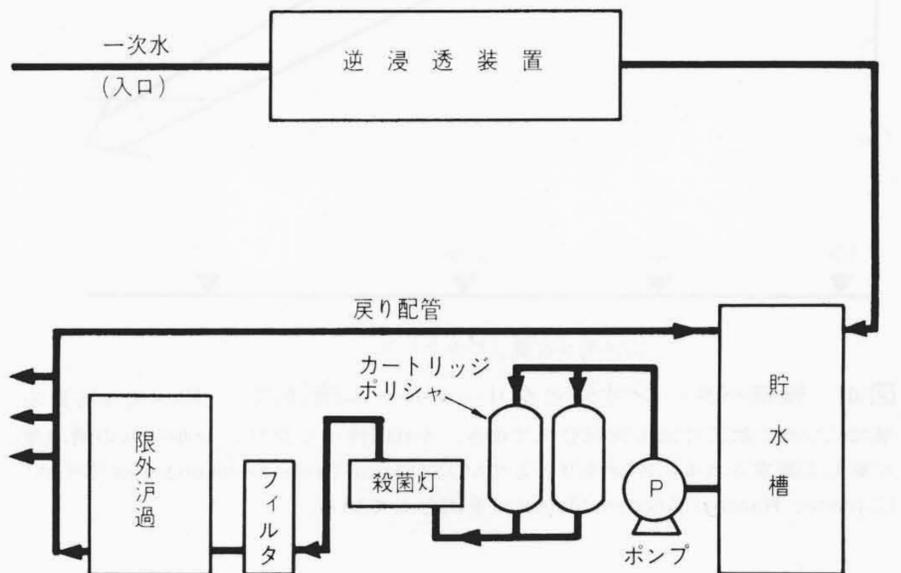


図3 超純水製造フロー 最近の純水製造システムは、逆浸透装置と限外濾過装置によって超純水を得られるようになった。

0.02以下、有機物(ppm)は0.1以下、比抵抗(M Ω ・cm)は18以上が要求されるであろう。

この超純水の実現には、純水の分析技術及び分析装置の開発が先行して行なわれなければならない。

また、排水の放流規制も環境問題の立場から極めて厳しくなっているため、廃水処理装置は常に一歩進んだ廃水処理技術を導入したものがほしい。

4.2 クリーンシステム

(1) 清浄度

清浄度の規格として、米国連邦規格209b(表3)があるが、最高で清浄度は100である。ICデバイスが要求する清浄度との関係をSi(シリコン)・MOS(Metal Oxide Semiconductor)・DRAM(Dynamic Random Access Memory)の場合を図4に

表3 米国連邦規格209bの要旨 0.5 μ m以上の微粒子数で規定されている。また、定義は100までしかない。

クリーンルーム 清 浄 度	粒 子		圧 力 (mmAq)	温 度			湿 度			気 流 換気回数	照 度 (lx)
	粒 径 (μ m)	累積粒子数 (個/ft ³)		最 高 ($^{\circ}$ C)	最 低 ($^{\circ}$ C)	誤 差 ($^{\circ}$ C)	最 高 (%)	最 低 (%)	誤 差 (%)		
100	≥ 0.5	≤ 100	1.25以上	25	19.4	± 2.8 特別には 0.14	45	30	± 10 特別には ± 5	層流方式 0.45m/s ± 0.1 m/s 乱流方式 ≥ 20 回/h	1,080) 1,620
1,000	≥ 0.5 ≥ 5.0	$\leq 1,000$ ≤ 10									
10,000	≥ 0.5 ≥ 5.0	$\leq 10,000$ ≤ 65									
100,000	≥ 0.5 ≥ 5.0	$\leq 100,000$ ≤ 700									

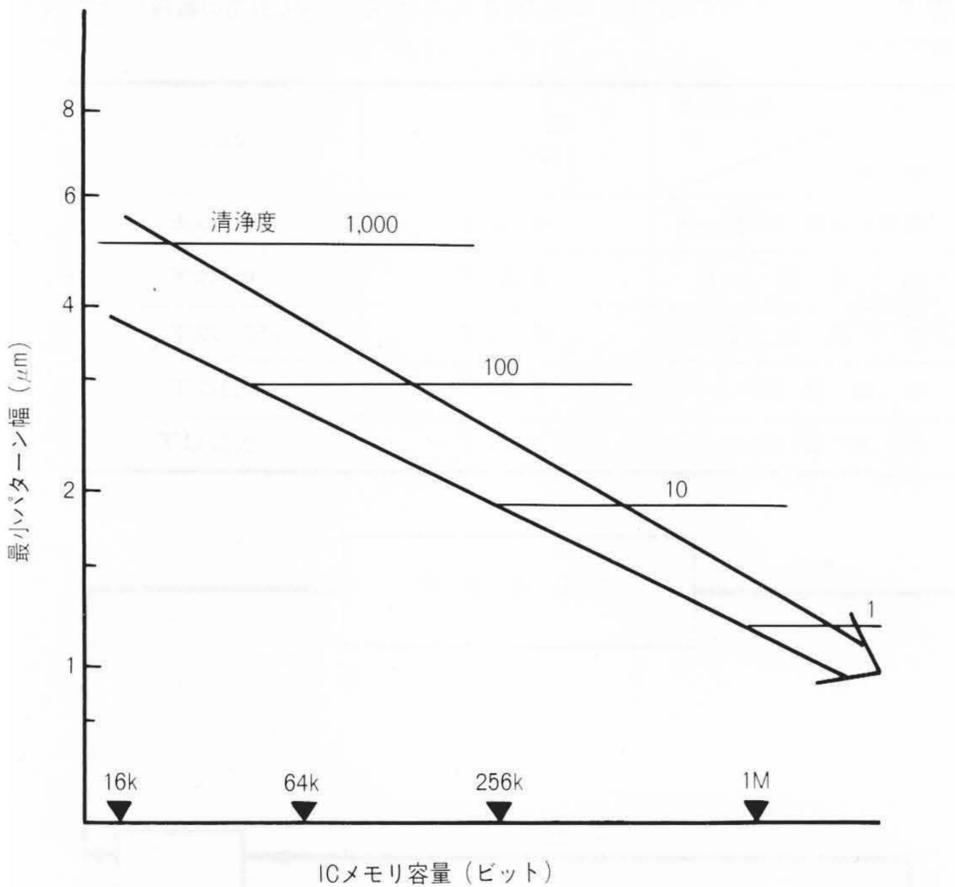


図4 微細パターン寸法とクリーンルーム清浄度 ICメモリ容量の増加につれて加工寸法も微細化してゆき、それに伴ってクリーンルームの清浄度が厳しく要求される。ICメモリとしてMOS(Metal Oxide Semiconductor)DRAM(Dynamic Random Access Memory)を例としている。

表4 動作による作業員の発塵量 人間が大きな発塵源であることが分かる。清浄度を良くするには省人化又は無人化は是非必要である。

動作	粒径0.3 μ m以上(個/分・人)			0.5 μ m以上(個/分・人)			
	衣服	無塵服		普通作業服	無塵服		
		普通作業服	白衣形 カバーオール形		白衣形	カバーオール形	
立っているとき	—	543	151	13	339	113	5.58
座っているとき	—	448	142	14	302	112	7.42
腕の上下	—	4,450	463	49	2,980	298	18.6
上体の前屈	—	3,920	770	39	2,240	538	24.2
腕の自由運動	—	3,470	572	52	2,240	298	20.6
屈身	—	4,160	1,110	62.5	3,120	605	37.4
足踏み	—	4,240	1,210	92.1	2,800	861	44.6
歩行	—	5,360	1,290	157	2,920	1,010	56.0

注：単位(千)

示す。現在話題となっている256KDRAMでは、清浄度10以下を要求している。また、製品はデバイスプロセスに適合した清浄度のクリーンルームで製造すべきであることを、同図は示している。更に、今までクリーンルームは製造現場としてあまり配慮されていなかったが、今後は、クリーンルームは主要製造装置であるという認識をもつべきであることを強調したい。

ICデバイスを作るには、作業現場の清浄度の管理は当然のことであるが、現場内での発塵源を極力除去する必要がある。

作業員による発塵のデータを表4に示す。クリーンルーム内では、いかに省人又は無人化が重要であることを教えている。

(2) 測定技術

清浄度の向上とともに、測定技術や測定器の開発は先行して行なわれねばならない。

現在、塵埃測定器として、レーザを用い、塵埃によるMie散乱光をホトマルで検出する方法があり、最小0.08 μ mの塵埃まで測定できる。更に、面板欠陥自動検査装置は0.2 μ m以上の欠陥が検出できる。

表5 微細加工に伴う要開発技術と使用装置 微細化をしてもスループットを落とさないことがキーポイントになる。

		最小線幅	5 μ m	3 μ m	2 μ m	1.5 μ m	1 μ m
プロセス	マスク技術	光学描画装置					電子ビーム描画装置
転写技術	密着露光装置			1:1投影露光装置			電子ビーム露光装置(直接描画)
					5:1及び10:1縮小投影露光装置		X線露光装置
エッチング技術	プラズマエッチング装置						
	ウェットエッチング装置						反応性スパッタエッチング装置
計測技術	寸法	光方式測定器					SEM方式測定器
	塵埃	光方式測定器					レーザ方式測定器
	異物	光方式測定器					レーザ方式面板欠陥検査装置

注：略語説明 SEM(走査電子顕微鏡)

5 微細加工と要開発設備

集積度の向上につれて、製造、計測装置とも、技術的難度が増すために、このままでは、低い処理能力で高価格の装置への道を歩むことになる。表5に微細加工に伴う要開発技術とそれに関連する装置をまとめた。

図2にも示したように、高い処理能力で、適正価格の装置開発のための技術的ブレイクスルーは必須のことである。

6 結 言

ICの高集積化は、また年2倍のスピードでの向上は、微細加工技術の進歩に大きく依存することを述べた。それには高精度、高処理能力、高信頼性の装置が要望されるとともに、製造プロセスのノウハウを組み込んだいわゆるソフトウェア技術を結集した装置で、新製造技術の変化に対応してゆく必要がある。また、作業現場の清浄度、純水の水質、薬品の純度や廃水の環境問題処置など製作製品に適したレベルのものを一つのシステムとして考慮してゆく必要がある。