開発秘話：半導体露光装置

株式会社ニコン 執行役員 精機カンパニー　諏訪 恭一

半導体露光装置は日本の光学技術産業の上に咲いた空前最大の装置である。

第二次世界大戦以前の国策光学兵器が敗戦後、民需に転用され戦後カメラ輸出産業となった。歴史的に自動車輸出以前に精密機械産業から作られるカメラは外貨獲得の尖兵となった。

■ 科学技術教育

それを支えるべく、日本の大学、研究所の光学技術、研究者教育が精密機械および物理工学系学科で行われた。大学の光学講座は往時、東京大学、東京工業大学、大阪大学、北海道大学、早稲田大学、上智大学、学習院大学、日本大学、中央大学等において幾何光学、物理光学が研究され、学部の単位や卒業研究に向け教授された。また、アメリカにおいても、ボストン地区、ロチェスター地区、アリゾナ地区、サンフランシスコ地区にも著名な講座や研究所が創設された。アメリカでは特に東西冷戦下の超高性能地上観測望遠鏡や画像処理が発達した。これらの幾何光学、波面光学は既に歴史的使命が終了したのであろうか、今やその多くの講座が情報処理の講座に転身し、アメリカでは幾何光学の講座が消滅してしまった。東西冷戦終了後、ドイツ光学は今や再度独自の強力な力を発揮しているが、当時ドイツ最大の光学会社CARL ZEISSは東西に二分割されたままであった。即ち光学はドイツ中心から日本、アメリカに移動した時期であった。また、1960年前後に人類史上画期的な人工光、レーザが発明された。レーザは、当初ホログラフィーに応用され、一見応用で迷走したが、目的が明確化され位置計測の干渉系に応用され始めた。日本においては、光学講座のみならず物理講座や電気電子工学講座では、レーザの研究が猛烈に行われた。レーザの波長安定性は、水銀ランプの数桁上なので、位置計測、凹凸計測において画期的な精度向上がはかられた。

レーザ計測精度の画期性は精密機械の精度向上に直接貢献することとなった。精密機械においては加工精度、制御精度が最終精度を決める。レーザの発明で面精度は平面干渉系で向上し、制御精度は位置決め干渉系で向上が期待できる。

干渉系の量産実用化は、日本よりもアメリカで進み、それを用いた大型反射レンズが最初パーキン エルマー社にて半導体露光装置として製品化された。

上記のごとく大量に技術者が大学から輩出されたことと、レーザが実用化され精密機械の精度が飛躍的に向上できる基盤がそろったことが、露光機開発成功の理由のひとつになったと思われる。往時を振り返り、露光装置開発に携わった当時のニコン光学装置開発の多くが、上記分野出身の若き光学・レーザ専攻者で占められたことがそれを物語っている。

改めて、大学研究機関の存在と、大学が産業界に有為な人材を教育し送り出すことの意義を感じる。

■ ニコン露光装置

露光機は超大型超精密機械である。

高速移動ステージの位置合わせ精度は10万分の1ミリメートル以下。これは東京から富士山頂までの尺度で1メートルの誤差しか許さない位置合わせを繰り返し高速で再現することを意味する。解像力は顕微鏡と同様クラスが要求され、かつ画面サイズは顕微鏡の10,000倍が要求される。当初は苦労続きであったが、それはまた楽しみでもあった。大きく分けると二段階になる。第一段階は10対1露光機が完成するまで。第二段階は高スループット露光機が開発され、真の量産機器として市場に認められた段階である。

いまだから話せること、と言うほどではないが、予想以上に当時の状況は厳しいものがあった。順を追って回想すると、

①露光機の概念が確立しなかった

一貫して計測機器開発販売に取り組んでいたニコン技術力が応用できたのである。自分達の良く知る計測機器の諸概念を露光機に適用した。露光機も計測機器も煎じ詰めると同種の精機機器であると認識していた所以であろう。例えば、ステージの位置をガラスマークで管理する方法や、オートフォーカス、アライメント方式など統べて、半導体検査機器の技術を発展させた。当時、世界中で数社が同時にステッパー開発を行っていたが、スループット、量産性、解像力、アライメント精度と、どの分野も平行して量産機のコンセプトを独自に推し進め得たのはニコンだけであったと推察される。

②高速高精度ステージ制御技術がなかった

産業生産財に本格参入した光学機器は露光機が最初である。安定した高速性を当時の常識以上に要求された。長期間の連続運転に耐えるステージは計測機器と全く異質であり生産財の特徴である。この問題は、地道にモータ制御を研究していた20代の技術者が、「必ずできます」という信念の報告を行い、その主張を信じて成功した一例である。日々物事を考え、自ら手を動かしている設計者でないと本質の直感が働かないのであろう。また個人の力が大きく物を動かす例であった。

③超高性能レンズ評価、製造技術が確立していない

当時高性能光学レンズの図面は完成した。しかし、ある特定の製造技術の壁がどうしても破れず前進が滞ってしまった。当時、私は駆け出しの技術者であったが、上司から現場で何が起こっているのかを見てくるように指示された。現場に行き、熟練の課長、係長から製造工程を詳細に見せてもらった。全く未知で解のない場合、哲学が役に立つという貴重な経験を味わった。

聞き取りするに、精密品はどうやって作るのですか？曰く丁寧に作る。カメラレンズはどうやって作るのですか。曰く、急いで作っても大丈夫。これは、人間の感覚でできない範囲をゆっくり作業し

ているにすぎなく、きわめて偶然にしか製品ができないことを示唆している。当時私は歴史哲学書をいろいろ読んでいた。その中の著者梅原猛氏は古代史を解明し、通説であった従来の歴史解釈を賛否両論はあるが独特の推理で論破していた。その論理展開を学んで、自分の現実問題に適用する機会と思われた。即ちレンズ作りで、限界を超えた精度を達成したいがために、無理に勘を働かせる無理を悟った。どうしても新型計測器開発が必要である。これが私の決意であった。結局、社内で全く別の目的のために作られていた超高精度計測器をレンズ作りに適用し、限界の壁を乗り越えた。この結果、レンズが量産困難の壁のひとつを越え得た。

これに限らず、各部門がそれぞれ壁を越えるべく開発していたが、即ち量産機の礎はできたが真の量産機になるには更に大きな壁があった。それはスループットとレチクル上のゴミ問題である。スループットは多くの改良があり専門的でありすぎ、ここで省略するが、代表例でゴミの問題を述べる。

当時のマスクを使う露光はゴミの存在を認めても良い露光手法であった。即ち、マスク上には幾数十の同一画面が繰り返し配列され、どれかがゴミの存在で不良になっても他の画面が良品であるとICは作れる次第である。そこではゴミはDangerであるがFatalでない。多数の同一集積回路を同一ガラス基板に繰り返し載せるものをマスクと呼び、その原盤をレチクルという。レチクルを直接縮小投影露光するのがステッパーである。ステッパーの実用化はレチクル上のゴミが散在しないこと。また、そのゴミがあっても検査できることである。レチクルは原盤ゆえ、ゴミがあるとすべてのゴミ像が繰り返しウエハーに転写され全面不良となる。即ちレチクルのゴミはFatalである。

「検査できないと使用できない。使用しない。」と某半導体製造メーカー技術者は主張した。当時の半導体メーカー技術者の慧眼に往時を振り返り感心する。これも新しい壁であった。ゴミを洗浄し、検査するゴミ洗浄検査機の開発が鍵となった。

当社検査機計測系開発のエースが投入された。実験室にて、終夜実験し、計測角度の設定を数箇所にわたって行い、非常に信頼度の高い検査機を開発した。この担当者は大学でレーザを専攻した開発者であった。さらに洗浄装置とゴミ検査装置が一体化し製品となった。

かくして半導体の大量生産に耐えうる装置となった装置は、縮小投影型露光装置NSRシリーズと名称され国内外に出荷されていった。露光装置は現在までに累積数千台出荷され、世界の半導体はニコン製露光機で半数以上作られていると思われる。

縮小投影型露光技術の確立が半導体を真の量産技術に押し上げたのであり、その関連の半導体製造装置は露光装置を軸とし発展したと言われる。半導体露光装置が安定し、半導体製造はノウハウから科学に変化したと言われ、科学ゆえ、誰もが努力さえすれば勉学でき、それが逆に日本、アメリカ独占の技術から世界に敷衍拡散したと言える。



往時のニコン縮小投影型露光装置NSRシリーズ

現在、特に海外の大手半導体製造メーカーの技術者が必死に主張するのは稼働率であり、COOであることを考えるにその黎明期は技術の関心の高さ、重要性が極めて純粋な議論であったことが懐かしい。また損得抜きの技術論を交わした多くの日本人技術者の熱き思いが懐かしい。現在は金を背景にした投資の回収の議論が主になり時代の流れとなって久しく、このままでは遠からず純技術的な大きな壁に直面しないとも限らない、重要な時期を迎えているのではないかと思われる。

さて、往時からの教訓で今後を考えることをお赦し願いたい。第二次世界大戦後、日本経済混乱時代、資源のない国が生き延び繁栄するために、即ち技術立国を目指し、昭和30年代、40年代、日本国は現在に比較ならない真剣さで理化学教育を行ったのではないか。大学入試では現在の入試科目数に比較にならない多くの人文分野、科学分野科目試験を実施した。理化学技術従事者に対しても高度の国語教育を授け、自ら考える素地を教育したのではないか。本文でも技術立国を目指した時代に教育を受けた企業人の果たした役割を些かなりとも述べたつもりである。今日、文部省やマスコミは国際化教育やゆとり教育を言うが、原点に戻り、資源のない国を今後とも振興させるために強力な理化学教育を再度推し進めるべきではないか。若者に充実した教育をし、技術立国以外に国を保持する道は難しいと考える。

さらに、上記露光機の開発の原点に、超LSI研究組合が強力な国家プロジェクトとしてあったことが大きい。先の見えない現代と言われるが、短期間で有力企業が分担し、官学共同ですすめる国家プロジェクトの効果は大きい。技術開発は一企業の通年利益を超えた資金が必要であり、国が主導する価値があると信じる。若手の技術者も異業種との共同開発で成長するのであり、人材育成と産業育成の両方の効果がある。今後とも強力なプロジェクトが必要である。

駆け足の記述であったが、往時を垣間見ていただき、読者諸子のご参考、教訓になっていただければ筆者の喜びである。

開発秘話：縦型装置

株式会社日立国際電気　執行役常務 黒河 治重

■ まえがき

(株)日立国際電気(旧国際電気(株))は、1957年から高周波加熱応用機器として半導体製造装置メーカの道を歩み始めた。この点においては国産化装置メーカの草分け的存在である。その後各種の製品開発を行い、半導体デバイスメーカのニーズが拡散・CVD装置へと集中する中で、会社としてもこの分野に注力してきた。周知の通り、半導体業界はシリコンサイクルに翻弄されながらも産業のコメとして発展を続けている。弊社もその洗礼も受けながら生き延びてこられたのは、新製品の縦型装置を開発成功させ世界の市場に拡販できたことである。なぜ縦型なのか？当時横型装置は競合も多く、国内ビジネスに限られていた弊社は、不況のたびにシェアが少なくなり苦境に立たされていた。何とかして新規事業を立ち上げたいという経営的戦略と製品戦略が縦型装置で一致し、縦型装置に賭けようとした経営トップの英断があった。

■ 縦型装置の開発コンセプト

1983頃の開発時点にさかのぼるが、半導体業界はシリコンサイクルの底で、デバイスメーカではDRAM主力製品を64Kから256Kへと1Mも視野に入れた製品開発にしのぎを削っていた頃であった。大口径化(150mm)、微細化指向(1.3ミクロン)に装置メーカもこれに対応した装置開発を要求された。半導体素子の集積度が高くなるにつれ、もはや自然酸化膜の影響を無視することができなくなった。パーティクル、自然酸化膜、膜厚の均一性の条件も厳しくなり、当時の横型装置でこれが満足できるかという検証が必要となった。半導体最大手の研究所と生産技術部門に依頼し、共同での検討が始まった。横型装置の温度シミュレーション、ウエハ温度直接測定、大気O_2の巻き込み可視化を行うことで、横型装置の温度分布とガス流れを確認した。問題は炉内への大気O_2の巻き込みに対する適切な防止策が見つからない。反応室内のガス流れの均一化や温度制御の高精度化に限界がみえた。この自然酸化膜の除去と省エネルギーの問題に対応すべく、1983年頃から縦型装置の開発に取りかかった。製品戦略的な面から、縦型拡散・CVD装置の開発基本コンセプトとしてウエハ径150mm化とプロセス微細化1.3ミクロンにおき、世界のお客様に通じる、世界一コンパクトな装置を目指した。

■ 要素開発

1.心臓部ヒータ

要素技術としてまずヒータの製作であった。まず取り組んだことは、ヒータを立てて上方を塞げば大気の流入はとめられる。したがって自然酸化膜の除去と省エネに効果あると判断したが、感覚的には分ってもデータがなく説得力は乏しかった。その証明方法を模索中に、水とお湯を使っての可視化実験を思いついた。横型装置のモデルでは横に向いた処理室開口部の上部から暖かいガスが流れ出て、冷たい大気が下部から入っていく様子がうかがえた。縦型装置のモデルでは処理室開口部を下方にすると、冷たい大気は処理室開口部で淀んでいるだけで処理室の中には入っていかなかった。この実験結果から基本仕様を下方開放型・下方からのガス導入方式とした。残った問題はヒータの長さである。果してクリーンルームに入れる高さにして、必要な均熱長が取れるヒータが作れるのかが議論の的になった。そこでヒータ上部を徹底して断熱し、ヒータを立てて実験をした。天井は焦げず、問題は起らなかった。また、温度プロファイルを取ると大気の流入がないことから、ヒータ長が短くできる可能性がでてきた。そこでヒータ内温度を振り、温度プロファイル・ウエハ温度・ヒータ内外周温度等、徹夜の連続で温度データを取り、ヒータ設計シミュレーション技術の完成度を上げていくことで、高効率高精度のヒータ(消費電力25%削減)を搭載した試作1号機を完成した。基本性能を評価した結果、大気巻込による酸化膜の量を70%低減し、横型装置に比べフロアスペース60%削減目標を達成した。

2.コントローラ

コントロールシステムは縦型装置の省スペース、省配線、高機能高信頼性を実現するため、分散化した。各制御系は光ケーブル通信を採用し、8ビットMPUを配した。特に操作系では日本語カナ表示およびメニュー選択方式を採用することで、大幅な操作性の改善ができた。また、温度制御系ではデジタル制御に変更し、全てMPU処理することで、温度を高精度に制御できるようにした。搬送系では各軸のストローク、動作スピード、停止位置等を制御し、ステッピング、ACサーボ等のさまざまな軸にも対応できるよう専用の軸コトローラを開発した。しかし、ウエハ枚数検知機能の実現のため、光電センサ、近接センサ等を使用した実験の試行錯誤で苦しんだ。試しに超音波センサでビニールテープの断面方向を検知させたところ、うまく検知することが分り、ギブアップ寸前で解決策が見つかるというエピソードの後に、最も信頼性の高い超音波センサによるウエハ検知機能を開発した。

3.ウエハ自動搬送

微細化に伴う自然酸化膜とパーティクル発生防止のため、ウエハ洗浄後30分以内に処理室内に挿入した方が良いというお客様のアドバイスを採り入れ、2ボートシステムに勝る性能とスループットなどを実現する1ボートシステム開発にチャレンジした。ウ

エハ移載に使える時間はボートの挿入で15分必要なため、残り15分でプロセスウエハ100枚とモニターウエハ5枚の移載をしなければならなかった。これを実現するためには、より高速で枚葉搬送するか多数枚を一括で搬送するかの選択であった。問題は適正な枚数は何枚かであった。ピッチ変換機構も必要であった。ウエハカセットはウエハ25枚収納が主流であったことが決めてとなり、ピッチ変換も容易で、ユニットもコンパクトにでき柔軟性があることから判断し、5枚一括ウエハ移載方式を採用した。また、ウエハと接触するツイーザはウエハ汚染やズレ防止など細かいことでの苦労も多かったが、最終的には石英メーカの協力で困難を切り抜けた。

■ 縦型装置の量産開発

1.VERTEXの誕生

量産スタートにあたり装置商標(モデル名)を考えることになり、事業部門内で募集して決めた。世界中に売れることを祈念してVERTEX(最高、頂点)とした。国内は問題がなかったが、6ヶ月後あたりに欧米では使えないということが分り困惑した。充分調査したつもりが、落とし穴があった。急遽欧米向けだけはVERTRONとした。新製品はコンセプト通り世界最小のコンパクトな縦型装置と成った。営業と何度もデザインレビューを実施すると、カセットローダは必要。さらに150枚化も必要になるという幾つかの追加の希望がでて、さらなるマーケティング戦略からオリジナルな真空ロードロック方式を含め4機種準備した。コンパクト設計で工夫した点は、装置のワンボデイ化のためにウエハ移載機やガスシステムも本体に組み込むことであった。さらにヒータに関しては、成形ヒータを開発し、トランスレス化を実現し、サイリスタも水冷式で小型化した。1986年に1M DRAMラインに納入した初の量産機VERTEXシリーズを写真1に示す。



写真1:初の量産縦型装置

2. 夏の苦い思い出

この量産装置市場の入口で最も苦しんだのは、ケーブル断線であった。動作回数も我々が想定していたものよりはるかに多くなり、時折断線が発生した。これに関しては、長寿命化ケーブルの再評価を行い改善できた。お客様の現場で、夏休みに交換させていただいたりした。ご家族の大切な夏休みのスケジュールまで狂わし、つぶしてしまって申し訳ないという気持ちであった。半導体装置業界に身を浸し装置開発に携わっていると、試作段階での市場で成功しても量産段階での市場で成功するという保証はなく、その間にはかなり難しい困難が横たわっていることを幾度か経験してきた。ゴルフで言えば、ロングホールの2打目にグリーン手前に大きな谷越えがあるがごとくである。量産縦型装置においては装置信頼性を重視し、品質第一を目標に掲げスピードと知恵で対応を心がけた。

3.猛烈に働くお客様への感謝

弊社縦型装置を量産装置へと導いていただいたのは、開発段階から縦型装置を採用していただいた国内最大手デバイスメーカ、最も多くの装置を購入していただき、量産装置としてのブラシュアップをしていただいた世界ナンバーワンメモリーメーカ、そして特に“コピーイグザクトリ”思想をご指導していただいた世界に冠たるMPUメーカ等、数多くの世界のお客様である。感謝の気持ちで一杯でありますが、特にコピーイグザクトリにおいては安全性に関して厳しい要求と当時は感じた。SEMI規格のS2は存在していなかった頃に、現状のS2に匹敵する項目は全て網羅したことをクリアしなければならなかったこと。さらに苦労したのは、安全に関するサードパーティの育成とそのサードパーティによる認証であった。一緒に仕事をしていた人達は、現在日本のSEMI安全部会の主要メンバとなっている。装置検査においても指摘事項改善立会に1ヶ月以上に及ぶご指導を受けた。ハード仕様もさることながらプロセスも全く同じ、装置ごとのチューニングが許されない。そのため、装置に対してマージンが要求された。例えば、装置を海抜2,000m近くある気圧が低い工場に納入時、自動的に気圧差により他のパラメータを変更することができるようにした。量産の段階で海外のお客様と一緒に仕事をするようになってから、当時がむしゃらに働くのは日本人だけと考えていたが、米国、韓国、台湾どの工場においても強烈に働く猛烈幹部、技術者が多いのには驚き、認識を新たにした。

■ あとがき

装置拡販の要であるプロセス評価技術については紙面の都合で割愛させていただいた。ヒータ要素開発グループはお客様とともに1993年に日本機械学会賞を受賞した。現在では熱流体シミュレーションや流れの反応室内での可視化実験などは、3D CADのお陰で新入社員が基本と成る方程式などを理解しなくても容易に画面で理解実施し、試作期間を短縮できるようになった。隔世の感がする。またお客様から栄誉ある2〜3の賞をいただき、2003年の6月で累積出荷台数が5,000台を突破した。

縦型装置は当時、私が新任の開発設計部長としての初仕事であったが今では最年長者となり、かつて若かった部下の協力を再び得て執筆できたことは、男達のロマンの実現であったかもしれません。

本稿が道標となり今後に役立つことを祈ります。

開発秘話：コータ・デベロッパー（MARK V）

東京エレクトロン九州株式会社 クリーントラックBU 開発部長　木村 義雄

■ エピローグ（88年）

突如、実験室から甲高いパルスモーターのロボットの音がする。なにやら隣がさわがしい。皆が集まっている。慌てて駆け寄る。動くかなという不安はあったが、あっけない瞬間だった。ウェーハがたよりないフォークに保持されたまま、いろいろなポジションへ移動していく。上下、左右、回転も自在だ。ウェーハの移し変えが人間の手のように2本のフォークで行われる。鳥肌が立った。これが、俺たちのあたらしい搬送ロボットか・・・まさにMARK V誕生の瞬間だった。

■ 不況にあえぐ行き場のないエンジニア

MARK Vの開発プロジェクトが発足したのは、半導体不況の真っ只中87年の10月であった。まだ仕事も覚えたての私は、突然の不況に将来の不安を隠せなかった。優秀なエンジニアはどんどん辞めていった。転職したくとも経験が浅く、どこも採用してくれない。それならば、やれるだけ、やってみるかという開き直った気持ちがあった。やがて88年になり、上司から「新装置のシステム設計をやってくれないか」と声が掛かった。小躍りした。経験は浅いが設計には自信はあった。どこまでやらせてくれるのだろうか？当時の量産機種MARK Ⅱは東京エレクトロン山梨から引き継いだもの。競合メーカーにシェアを握られて2番手であるが、どうせやるなら私たちだけで業界に通用する装置を一から作ってみたい。そんな雰囲気がどの顔にもある。メンバーは一癖も二癖もある人たちだ。自動車屋がいる。プラント屋がいる。電気屋、他にもいろいろな職種が集まった。不況で毎日草むしりしていたものもいる。もう怖いものはない。リーダーは半導体メーカーの経験者だ。このまとまりのない連中をどうしようかと知恵を絞ったことだろう。

■ クリーントラックの歴史

東京エレクトロン（株）が国産化した初代のクリーントラック（2～4インチ）。これはもともと、米国製装置をモデルに作られたものらしいが、それまでの炉によるバッチ処理ではなく、ウェーハを裏面から直接熱板で加熱するという「コンダクションベーク」を採用していた。また、名前が示す通り、クリーンなトラック搬送モデルでもあった。MARK Ⅱはトラックタイプの最終形である6インチモデルだ。さまざまなプロセスレシピに対応して制御系が強化された機種といえる。塗布や現像処理装置でのウェーハへの付着パーティクルも削減された。また、この機種の頃から露光機インラインモデルの登場がみられる。露光機と直接インラインしウェーハ処理を行うようになった。

■ トラック搬送装置からロボット搬送装置へ

当時のトラックタイプの装置設計は困難を極めていた。装置ごとに、プロセスモジュールの数が違う、装置の長さが違う、内蔵物の構成も違う。フレームからパネルから配線、配管も都度設計なのだ。それを1ヵ月そこそこで設計して、即出荷となる。フレームの梁の入れ方が悪く、ユーザー搬入時にフレームが倒壊するという笑えないトラブルもあった。逆に梁がじゃまで、内蔵機器が入らずに、のこぎりで切断する場面もあった。装置の標準化はエンジニアの切実な願いであった。モジュールの順列にかかわらず、同じフレームが使えないか、同じフットスペースに多くのモジュールを搭載するには縦型配置も有効だろう。一直線に並んでいないモジュールにウェーハを搬送するには中心となる搬送ロボットが必要となる。モジュール間搬送ではなく、共通搬送の制御が必要となる。私たちはこのときにトラック方式と決別した。その後の難航苦行の始まりである。

それまでのコータ・デベロッパーにはウェーハの基準搬送高さが存在した。クリーンルームのダウンフローでは清浄度を保つには最低高さが規定されていた。高すぎると、カセットの操作性が悪くなる。つまり、この基準高さの平面で搬送すべきであるということ。同時に、ウェーハ搬送面よりも高い場所に駆動部品を設置しないという暗黙のルールもあった。それらをことごとく崩したことにより、その後の装置ではウェーハがダイナミックに動きまわる垂直配置に装置コンセプトの流れが変わってきたように感じる。



■ エピソード

MARK Vの開発では最終形を皆が意識し、その前に立ちはだかる難題に真っ向から挑戦し、幸運にも恵まれブレークスルーができた。いくつかエピソードを紹介したい。

1)搬送ロボットの開発技術者は頭を抱えていた。真空吸着のハンドで順調に搬送していた矢先のことである。ベークから取り出したウェーハを保持するために、吸着パッドが温度上昇してしまう。塗布工程前のウェーハを運ぶ時に、ウェーハへの熱転写が膜圧変動を引き起こした。共通搬送の欠点ともいえる。やはり、3本目の専用ハンドが必要か？しかし搬送はシンプルがいいはずだ。ハンドが多くなるほど信頼性は低下する。行き詰まったかにみえたとき、斬新なアイデアが飛び込んできた。「外周保持搬送に挑戦できないか、同時にウェーハ自重を利用してセルフアライメントもできるかもしれない」。ウェーハをそんなに乱暴に扱ってパーティクルは大丈夫か？もう失敗は許されない。これしかないなら、とにかくやってみよう・・・結果はご存知のように現在のウェーハ搬送の主流になった。熱の問題を解決しただけでなく、ウェーハへのパーティクル付着を少なくし、さらなる高速化への道ができた。まさに、災い転じて福となすである。また、生産性を追及して2本のアームにより上下でウェーハを入れ替えて搬送するコンセプトであったが、上のウェーハから下へのパーティクル落下が懸念された。開発技術者は言う、「カセットの内部でも同じことが起こっている。問題にすべきではない」。まさに信念の塊ともいえる。

2)OVENの開発技術者も無謀だった。いまの意思決定プロセスでは決して成しえないような、まさに直感だけで開発をすすめていた。熱板によるベーキングの後にクーリングが必要であるが、共通搬送ではベーク後の受け取り待ち時間が心配された。オーバーベークの危険はないか・・・プレート内部に滞留してもウェーハ温度を下げられるか・・・その技術者は言い放った「ある程度、プレートからUPさせればウェーハは冷えるはず。チャンバーカバーも明けてしまえばウェーハ周囲温度は外気と変わらない」。この判断はその後のOVEN開発の基本となった。現在のプロセスではこの程度の精度では使えないが、当時のプロセスでは使えるレベルであったことは幸いである。ベストな方法ではなかったかもしれないが、迅速な判断が早期の製品化に結びついたことは言うまでもない。

3)ウェーハの搬送制御は装置を実現するキーだったと思う。センダーカセットからレシーバーカセットへ移し変えるだけでなく、ユニカセットとよばれる、元のカセットスロットに処理済のウェーハを戻す機能を追加した。下のウェーハの後から上にウェーハを入れるため、パーティクルが懸念された。また、カセットのどのスロットにウェーハがあるかを検出するために、マッピング機能の開発が必要であり、カセットから取り出すためのピンセットがウェーハにキズをつけないようにすることが課題であった。また、当時のウェーハ搬送制御では、ウェーハの投入枚数が少ないロット開始時や終了時と、すべてのモジュールにウェーハがロードされた時では、搬送のサイクルタイムが違っていた。この違いは露光機とのインラインで問題にならないか、という不安もあった。実際は大きな問題なかったが、コータ・デベロッパーなどの大規模モジュール群を処理するウェーハの搬送制御には今でも課題はある。しかし、世代ごとに改善され高機能化しているのは事実である。ハードでは決して成しえない、ソフト開発の成果である。

■ 装置コンセプトとニーズ

この開発におけるコンセプトはなんであったかと考える。MARK Ⅱと同じ6インチ対応装置であり、インチサイズアップという目的でもない。設計の標準化という内なるニーズと、生産性向上、プロセスのフレキシビリティ、AGVなどの自動化対応という市場ニーズが、必ずマッチするはずだと皆が確信を持っていた。しかし、最初のまわりの反応は否定的な意見が多かった。斬新過ぎると・・・。コンセプトに間違いがないかとあせりが募った。営業部も応援してくれた。会長からは、「TELは他社がやらなかったことを一早くやって、成功して来た会社だ」「斬新過ぎると言うのは反対理由にならない」「信念を持ってやりなさい」と、励まされたという。社内方針会議では、そのようなチャレンジを支援する声によりMARK Vの開発が承認された。1年後の88年10月には試作機が出来上がり、内覧会が開催され、関係者も興味を持って集まった。一様に驚きが隠せない。「これで10年は安泰だ」と太鼓判を押す人もいた。89年12月のセミコン・ジャパン 1989はまさに晴れ舞台であり、競合メーカーをはじめ多くの人々に賞賛いただいた。足が震えた、苦労が実った瞬間だった。

■ 後記

私としても当時はまだ20代ではあったが、多くの仕事をまかせてもらい、このプロジェクトに参加できたことを誇りに思う。皆が信念をもって開発を成し遂げ、結果的に広く受け入れられた。MK-Vでは他にも書ききれないほどの新しい技術にチャレンジし、世に製品を送り出した。結果的に「科学技術庁長官賞」をいただくことができた。同時に膨大なクレームを発生させてしまったという問題もあった。89年以降千数百台が出荷された。いまも現役で活躍しているMK-Vもあるかと思う。その後は半導体製造技術の進歩に伴い、追いかけるように開発を続けてきた。ともすれば目標を見失いがちになる。原点に返り、いつまでもチャレンジする精神を忘れないようにしたいと思う。

開発秘話：洗浄装置

大日本スクリーン製造株式会社 常務執行役員　大神 信敏

1. 洗浄装置開発の背景

私が1969年に入社した当時、当社は印刷に使用される版を製造する機器の製造、販売を主たる事業とする会社であった。印刷の版を作る工程は写真製版工程と呼ばれ、半導体製造におけるフォトリソ工程の語源である。Photolithoを直訳すると写真石版であり、印刷の版が石を材料としていた時代にできた言葉である。当社は、写真製版機器の総合メーカとして光学機器や印刷版の表面処理装置を製造していたが、まだ半導体産業は誕生して間がない時であり、フォトマスク製造のための光学機器を製造していたのみで、半導体製造装置事業はまだ芽も出ていなかった。

一方で、この時期は東京オリンピックを契機にカラーテレビの需要が急速に伸びていた時である。当社では写真製版の技術を応用して、カラーテレビ製造に必要なシャドウマスクの生産を1963年に開始し、1967年には全自動生産ラインを完成させ、需要の伸びに対応していた。シャドウマスクの生産には、フォトレジストを塗布する前の金属表面の洗浄、フォトレジストの塗布、乾燥、パターン露光、現像、ウエットエッチング、レジスト剥離と半導体製造プロセスと共通な技術が必要であるが、当事はこのような機器は全て自社で開発、製造するしか道はなく、多くの技術者を投入して生産ラインを完成させた。酸やアルカリの液体を使用してフォトエッチング工程を自動化したシャドウマスク生産の技術が、将来の半導体製造装置事業進出の基礎になっている。

2. アルミ配線工程用ウエットエッチング装置の開発

シャドウマスク自動生産ラインが完成した後、電気、機械、化学を専門とする技術者集団の仕事がなくなり、彼等の技術を社外に販売できる事業開発が急務となり、そのためのプロジェクトチームが編成され、私も一員として参加した。ハングリーな技術屋集団であったので仕事になりそうなものへは何でも取り組んだ。公害防止のための廃水処理装置、IC用リードフレーム製造用の小型フォトエッチングプラント、プリント基板製造プラント等、自分たちの技術を売れる仕事であれば業界を問わず製品開発を行った。この活動の一つにIC製造用ウエットエッチング装置の開発が飛び込んできた。当時、少人数の部隊（5人程度）が米国より半導体製造装置の輸入販売をしており、そのビジネスのご縁で、あるお客様より開発依頼をいただけた。ICの製造工程も知らないまま、ご希望される機能を伺うため、お客様を訪問し、現在の作業方法、問題点を教えていただいた。エッチング処理に関しては問題なく開発できる自信はできたが、カセットtoカセットの自動化のご要求が実現できるか若干不安であったが、取組みを開始した。京都と群馬を何度も往復し、α装置でのエッチング処理の確認を行う一方、外部の会社にオートローダ、アンローダの開発をお願いし、全自動アルミエッチャーの開発を進めた。1975年、2“ φのウエファを使っていた時代である。ご



アルミエッチャー

希望通りの機能を発揮できる装置を納入させていただき、お客様にも喜んでいただけた。大日本スクリーン製のIC製造装置1号機である。この装置は他のICメーカでも好評でほとんどの日本のお客様に納入した。

3. バッチ式洗浄機への取組み

アルミエッチャーを納入させていただいたあるお客様より、「これだけの装置を作れるのであれば、他の工程用の装置開発をやらないか。」というお言葉をいただき取り組んだのが「硫酸剥離装置」である。高温の硫酸に酸化剤として過流酸アンモニウムを投入し、レジストの剥離兼酸洗浄を自動で行うという装置である。アルミエッチャーの開発時と同様、現在の処理内容、問題点、ご希望の機能を教えていただき、設計を開始した。乾燥を自動で行う方式として、ノズルより圧縮空気を噴出し、ウエファに吹きかけるという斬新な（?）アイデアを採用した全自動式「硫酸剥離装置」が完成し、お客様の新工場へ搬入されセットアップを開始した。それまでに多くの新製品を一発勝負で成功させてきた輝かしい履歴がこの装置で終了することになるとは夢にも思わずに。この装置では多くのことを経験させていただいた。

(1)高温濃硫酸は直ぐに液漏れを起こす。

(2)ウエファに圧縮空気を吹き付けてもウエファの周りに水が飛散するだけで、ウエファは何時までも乾燥してくれない。

(3)お客様に分けていただいたコーヒー自動販売機の砂糖供給部品は、耐薬品性の検証ができていなかったので直ぐに溶けてなくなった。

他にも石英ヒータの線切れ等、多くの問題を抱え、斬新な乾燥機は直ぐにお役ご免となり手動のスピンドライヤーを横に置いていただいたが、濃硫酸の液漏れのひどさに、お客様もとうとう音を上げられ一からの作り直しを命ぜられた。かくしてバッチ式半導体洗浄装置の1号機は引き取り処分となった。作り直しに際しては、失敗の反省を十分行い、現在の製品に比べると低いレベルではあるが、当時としては信頼性の高い装置を製作し

て入れ替え納入を行い使用していただいた。

4．バッチ洗浄装置の第二次産業製品化

半導体製造装置製造業はれっきとした第二次産業であるが、このバッチ式洗浄装置は生い立ちが他の工程の装置と異なり、流し台の上で行っていた作業を単に自動搬送して自動化装置として発展させてきたものであり、お客様ごとに固有のノウハウのかたまりとなっており、装置メーカのプロセスデータに基づく設計を基本とする装置ではなかった。お客様も過去の経験を重要視され、洗浄槽の形状等、プロセス結果に影響を与える要素は頑なに変更を認められなかった。そのために、各ICメーカにほぼ専属の装置メーカが存在し、一台ごとにノウハウのかたまりを反映させた装置を作らせるという形態が主であった。その中で、大日本スクリーンは全てのICメーカ様と均等にお付き合いをしてお取引をさせていただくべく、自動化に関する技術開発に力を入れ事業拡大を進めて行った。80年代の日本IC産業の発展に乗り、事業は順調に成長して行ったが、依然として手工芸品に近い製品であった。石英製洗浄槽の図面が600種類を超えるようになり、保守部品の供給にも支障が出る状況になって行った。この状況を打破して真の第二次産業製品とすることを目指して、当時の洗浄装置メーカとしては分不相応な洗浄工程専用の実験研究棟の設立を企画して、1992年に開設した。最先端のクリーンルーム、超純水プラント、数億円単位の分析装置を多数並べ、洗浄プロセスをデータに基づいて議論する下地を作った。多くのお客様に見学していただき、当社の洗浄装置に対する姿勢に対してご理解を求めた。お客様も、「洗浄工程の見直しをデータに基づいて行うべき時に来ている。」とのお考えをお持ちの方が多く「洗浄ミーティング」と称する技術者間の技術交流会が数社のICメーカと開始された。この実験研究棟で得られたデータに基づき設計された洗浄装置を社内では「統合化ウエット」と名づけ、全てのお客様に同じ洗浄槽を搭載した装置を納入することを合言葉に開発を進めた。当初は何社かで抵抗はあったが、当社で準備した多くのデータを説明させていただいた後、実ウエファを当社の実験棟に設置した当社オリジナル設計の装置で処理していただき、処理結果を当社技術者と共同分析し、装置の性能を確認していただいた。お持ち帰り後の社内での電気特性も良く、「統合化ウエット」にご理解をいただけるようになった。この実験棟から出てくるデータをベースにやっと洗浄装置が第二次産業製品らしくなった。

5．更なる挑戦

「統合化ウエット」の開発を進めるかたわら、「戦艦大和」と悪名を付けられるほど巨大な洗浄装置の小型化の開発が別グループで進行していた。「ワンバス式洗浄装置」の開発である。マルチバス式の従来型洗浄装置は薬液の種類の数だけ洗浄槽が必要となり、水洗槽、乾燥機と水平に並べるため、自動化対応のフルシステムでは装置長が10mを超えることもあり、小型化が熱望されていた。「ワンバス式」では1槽の中で異なる薬液を順番に流して処理をするもので、この方式であれば薬液の種類がいくつあっても装置が大きくなることはない。「順番に流す」というのは「言うは易く行うは難し」の典型で、槽の最終型が決定されるまでに技術者の多大な努力があった。コンピュータによる液流のシミュレーション、それに基づく試作品の評価。シミュレーション通りにはなかなか結果が出ない。何とか液の流れを人間の目で見れないかと、試行錯誤しながら「液流の可視化」技術を完成させた。槽の設計以外にも薬液供給システムの長期安定性の確保等、多くの技術課題を解決するのに技術者の挑戦が続いた。お客様の量産工場に納入された後に発覚した問題解決のため、鈴鹿山脈の峠越えを桜の花を見たり紅葉するもみじを見ながら続けた。これらの挑戦が実を結び「ワンバス式洗浄装置」は完成したが、「ワンバス」の考えは共同開発でご支援いただいたICメーカ以外では「統合化ウエット」以上に拒否反応が強く、普及には時間がかかった。「ワンバス」と従来式洗浄槽を自由に組み合わせられる装置を開発後やっと多くのお客様の認知をいただけるようになった。現在販売している300mm対応の「FC3000」はこの「ワンバス」との組み合わせを基本とした300mm用装置であるが、200mm用のマルチバス方式より30%以上小型となっており、世界中のICメーカに採用されている。

6．まとめ

洗浄装置を手がける技術が大日本スクリーンの固有技術にあったこと、ウエットエッチャーの開発にご協力いただけるお客様があったこと、エッチャーの技術を展開してバッチ式洗浄装置開発の機会を与えて下さり、失敗にも関わらずやり直しの機会をいただけたお客様があったこと等、洗浄装置事業スタート段階において幸運に恵まれていたことを有り難く思っている。1992年に実験棟を設立した後、この装置を他の工程機器のように、装置メーカの設計した第二次産業製品にすることに挑戦したこと、「ワンバス槽」開発に挑戦してシミュレーション技術や可視化技術を進展させる等、多くの技術者の挑戦魂がお客様に認めて頂けてのこの10年の発展であったと思う。今後も微細化を進める上で、洗浄工程には多くの技術課題が立ち塞がっているが、挑戦魂を発揮して前進して行きたい。



ワンバス式洗浄装置「FC-3000」

開発秘話：ダイサ

株式会社ディスコ 常務取締役 PSカンパニープレジデント　関家 一馬

株式会社ディスコは、1937年、広島県呉市に砥石メーカーの第一製砥所として創業した。

呉市はかねてより造船で有名で、戦時中は軍港として栄えており、戦艦の大砲の砲身の内側を研磨するための砥石が多く製造されていた。戦後の復興期、電力計メーカーから思いがけない商談が持ち込まれた。電気をいくら使ったかを計測するための積算電力計の内部にあるコの字型の磁石の先端を切断、研磨する必要があり、このコの字型磁石切断用の磁石を作れないかというものだった。それまでの切断用砥石は石材の研削加工用に用いられていたため、技術陣を総動員して砥石の薄型化に取り組み、当時では驚異的な厚さ1.2ミリの砥石の開発に成功した。これを契機に、ものを精密に切断するというテーマに関心を向け始めた。1956年、万年筆のペン先を切り割るための厚さ140マイクロメートル（1マイクロメートルは1,000分の1mm）の砥石を開発した。話を持ちかけてきたのは大手万年筆メーカーで、「役員がヨーロッパ視察中に、薄い砥石で万年筆のペン先を切っているのを見て、切断用の薄い砥石で定評のある第一製砥所ならこのような砥石はつくれないか」というものだった。その後、1960年代後半からトランジスタ・ブームの到来により、電子管ガラス、セラミックス、シリコン、フェライト、磁性抵抗体の溝付けなど電子部品の加工への用途が徐々に増大していった。砥石の薄型化はさらに進み、1968年ついに厚さ40マイクロメートルの超極薄砥石「ミクロンカット」の開発に成功した。しかし、ここにディスコにとって大きな転機となる壁が立ちはだかる。切断加工中に砥石が割れるというクレームに対し、取り付ける機械側に問題があると説明すると砥石が悪いと言われ、クレーム対応のたびに苦い思いをした。どんな高精度の砥石ができてもそれを使いこなせる切断装置がなかったのである。最初は日本の工作機メーカーに砥石を使いこなす機械の開発をもちかけたが相手にされなかった。ならば、自分達でやろうということになった。



写真1　DAD-2H

ミクロンカットの開発から7年目、ついに現在のダイシングソーの原型である「DAD-2H」（写真1）の開発に成功する。折しもシリコン・バレーでセミコン・ウエストの開催時期と重なり「DAD-2H」のデビューの場となる（写真2）。セミコンの会期中に装置のデモ運転を続け、競合他社の装置と違い「止まらない装置」ということで大反響を呼んだ。



写真2　当時のセミコン・ウエストのDISCOブース

事業内容が砥石メーカーから砥石を用いた半導体製造装置メーカーへと変化し、企業の体質も変化してきたことから、第一製砥所は1977年に英文社名の頭文字（DaiIchi Seitosyo CO., Ltd）をとったディスコに変更した。

ダイシングソーが順調に世界の市場に受け入れられて、企業として成長を始めると、お客様からも「これだけの精密な機械がつくれるのなら、なんでもできるだろう」と期待されるようになった。この期待から何でもできるような錯覚を起こしてしまい、手掛けて失敗した装置もあった。半導体製造用ウェーハの熱処理用の縦型拡散炉である。当時、「縦型」というコンセプトは世界的にも新しいものであったが、当社にとっては、「熱」という全く未知の領域であった。要素技術に乏しくユーザーニーズの把握も困難であった。優秀なエンジニアのほとんどをこの開発にシフトしたため、本来の切断装置の方の開発がおろそかになってしまい、競争力がなくなってしまった。当社の得意分野である、砥石と装置を使いこなすアプリケーション技術の蓄積が深いKiru・Kezuru・Migakuに集中しなかった苦い教訓である。

拡散炉開発の撤退と同時期に立ち上げたのが、X（エックス）プロジェクトである。平均年齢25歳、総勢15名。1年後のセミコン・ジャパンまでに主力4機種をモデルチェンジさせ、セミコン会場で動作させるという前代未聞のプロジェクトであった。その頃、



写真3　DAD320

某デバイスメーカーの北九州工場の課長から、「各工程の装置をU字ラインで並べて、オペレーターが全行程を一人で操作できるラインの導入を検討している。ついては、もっと小型で安い装置を作って欲しい。そうすれば200台は買う」という話が舞い込み、当初の計画になかったマニュアルダイサもモデルチェンジすることになった。当時の6インチマニュアルダイシングソーの横幅を900 mmから500 mmにしろと言うのだ。それを当時23歳のエンジニアが担当した。装置はなんとか完成したが、今度は電装が入らない。部品1点ずつのダンボール模型を作り、それを電装スペースにレイアウトしたところ、収まった。ならばどうにかできると奮起、新製品は小型化に加え、大幅なコストダウンを達成した。それがマニュアルダイシングソー300シリーズ（写真3）である。ようやく1号機の納入、評価にこぎつけたが、当の生産技術の課長はマレーシアに転勤してしまった。結局北九州工場の受注は取れず、マレーシア工場に10数台納入するにとどまった。しかし、装置の小型化が受け、国内外から多数の受注を得ることができた。当初の思惑とは違ってしまったが、大ヒット製品となった。

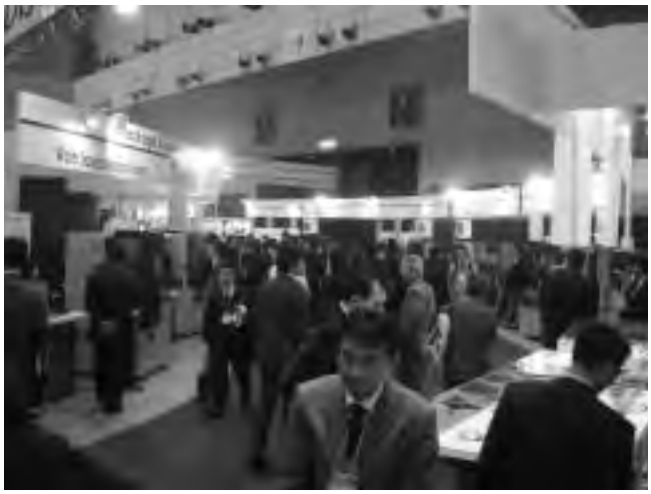


写真4　セミコン・ジャパン 2003 出展風景

この時から、当社ではセミコン・ショーできちんと動作する新製品を出展するというのが、技術者の大きな目標であり、励みとなっている。技術部門や営業技術の部長らはセミコンの会場で来年は何を出展するかをもう話し合っている（写真4）。

創業以来、積算電力計、万年筆のペン先など、顧客のニーズに引っ張られながら、当社は技術開発を進めてきた。これからも高度なKiru・Kezuru・Migaku技術にこだわり続け、徹底的に究め、高めていく。それが当社の強みであり、この3つの高度な技術でお客様の望む「最良の結果」を提供することがディスコの使命と考えている。

LCDに対する日本の新しいビジョン

日本企業のLCDディスプレイ市場を取り返す決意を象徴する積極的な投資・新技術

ーSEMI機関誌「SEMICONDUCTOR Manufacturing」2003年10月号「Japan ｓ New Vision for LCDs」よりー

“ 2002年10月、シャープと半導体エネルギー研究所が、「シートコンピューター」（連続結晶（CG）シリコン技術に基づいたLCDディスプレイ用に設計したガラス基板上のCPUと集積回路）を発表。
ー APF/CORBIS/Yoshikazu Tsunoよりー ”

わずか数年前、シャープ・東芝・松下電器・日立・富士通・三洋電機など日本の電機メーカーが連合して世界のLCD市場を日本の独壇場にしていた。だがそれはもはや過去のことである。積極的なアジアのメーカーがこの業界に目標を定め、各種サイズのフラットパネルを、競争相手の日本よりも常に低コストで生産できる先進的・効率的な工場に大規模な投資を行って強引に割り込んできた。最近ではシャープだけがノートPC・モニター・TVに使用する大型LCDのトップ五社に入っている。市場調査会社DisplaySearch社のデータにより比較してみると、韓国の三星電子とLGが世界市場シェアで一位と二位を占め、台湾のAUOとChi-Meiが残りの三つの位置をシャープと競っている。今のところアジアのLCDメーカーが商品パネル市場の掌握を強めているにもかかわらず、日本企業はR&Dにおける強みを活用して、競争する新しい道をみつけようとしている。その結果として、他の産業部門で先行できると信じるディスプレイの出荷を行いつつあり、革新的なプロセスと設計技術を使って製造した新しい市場を創出している。

■ 創造的な共同事業

競争の激しい新世紀のフラットパネルの土俵で有利に競争するため、東芝と松下は2002年4月に戦力を結集して、東芝松下ディスプレイテクノロジー（TMD）を設立した。この新しい会社は、東京品川に本社を置いて、約2,700人のスタッフを雇用している。同社はシンガポールにあるAFPD Pte Ltdに加えて、国内に5ヶ所の製造設備を持っている。同社によると、AFPD社は東南

開発秘話：メタル用マイクロ波エッチング装置

株式会社日立ハイテクノロジーズ 執行役　川崎 義直

1. まえがき

㈱日立製作所の中で、本社や茨城地区から最も遠い山口県下松市に、新幹線「のぞみ」や「リニヤモーターカー」を開発した笠戸工場がある。大正10年に㈱日立製作所の3番目の工場として操業を開始し、蒸気機関車の製造を皮切りに、鉄道車両だけでなく化学プラントや運搬荷役機械の開発・設計・製造で日本経済の高度成長と社会の近代化に大きく貢献してきた工場である。しかし、1970年代の後半には重厚長大産業が次第に陰りを見せ、79年の第2次オイルショックを契機に、当工場の業績は極端に悪化していった。当時、社内の部長研修に参加した化学プラント設計部長が、この研修で知合った中央研究所の部長に半導体製造装置の製作を勧められ、横浜工場が作るカラーテレビに使われるチューナー用SAWデバイスのバッチ式ドライエッチング装置を80年9月に納入することになる。これが笠戸工場で半導体製造装置事業を始めるきっかけである。その後、プラズマCVD装置やスパッタ装置の開発も手がけ、83年には枚葉式連続スパッタ装置や枚様式ドライエッチング装置、分子線エピタキシ装置の開発プロジェクトなどが同時進行した。またゲート用マイクロ波エッチング装置の特別研究も密かに遂行するなど、半導体装置事業は今後大きく伸びる新分野として多くの経営資源が投入されていた。

この年の11月、運搬機部門で大型荷役機械の開発を担当していた全くの門外漢の私は、運搬機部門の仲間6名とともに、化学プラント部門から独立したばかりの半導体装置グループに転属となった。

2. 隠れみの開発

当部門の業績はその後の3年間で大幅に伸張したが、85年に入り、初めてシリコンサイクルという大不況を経験することになる。このため、85年8月には開発を次世代8インチ対応のマイクロ波エッチング装置一本にしぼり、その他の開発は全て凍結することとなった。運搬機部門から移籍して2年にも満たない私が、その開発のティームリーダに指名された。しかし、売上が激減していたため当グループの業績は大幅赤字の状況で、開発資金の捻出もままならず、通常のやり方ではこの開発をスタートさせることは不可能と思われたが、工場幹部の関連部署への密かな説得工作が功を奏し、異例ではあったが研究所に格別のご支援をいただけることとなった。つまり機械研究所の試作として工場の技術者を研究所へ移し、開発資金の一切と執務場所を借りて死んだ振りをして密かに開発を推進する、まさに隠れみの開発体制を敷くことになった。

85年9月、開発ティームリーダの私を筆頭に7名の設計者が、笠戸工場に隣接する機械研究所へ移籍し、計算機室隣の小さな一室を借りて、μ（ミュー）プロジェクトと命名した開発プロジェクトを発足させた。μとは、開発すべき製品が、次世代のサブミクロンパターンをねらった超微細加工性を達成できるよう、熱い期待を込めて命名したものである。

3. メタル用マイクロ波エッチング装置、産みの苦しみ

プロジェクト室は7名でギュウギュウ詰めの状態で、喫煙者の多い部屋の環境改善のため、研究部長にご無理を言って、エアコンや換気扇も取付けていただいた。無謀なことにメンバーのほとんどどが、マイクロ波に関しては素人であった。

最初は、マイクロ波の伝播に関する文献や、エッチング特性に関する研究報告をあさり読むことから始めた。社内顧客の関連部門の方々から何度もニーズをお伺いし、装置コンセプトを作っていった。同時に特許の調査も開始した。特許はガセットによる調査にとどまらず、山口市の県立図書館や東京の国立図書館へも出かけて調べ、その数は10万件以上にのぼった。このプロジェクトの成功のためにはいくつかの重要課題を克服する必要があった。それは当時開発の最終段階にあったゲート用6インチ対応のマイクロ波エッチング装置M206Aをお手本として、

1）200mm対応の大口径マイクロ波プラズマ源
2）ダメージレス・インラインマイクロ波アッシャ
3）分散型高速マイコン制御システム
4）パーティクルレス高速搬送システム

などの新技術を開発することであり、これらを予定のコストで2年以内に完遂させることであった。

特に4)項については、ゴミの落下を防ぐためウェハを立てて搬送すべきだとの意見が大勢を占めた。しかし、ウェハを水平から垂直へ姿勢変更するための機構が複雑となり、搬送の信頼性やチェンバ内でウェハを垂直に保持することが技術的に困難で、とても期限内に開発できないと判断した。計画は思い切って水平姿勢で進める一方、ウェハの姿勢が垂直と水平でプラズマ中でウェハへのゴミの付着がどのように違うのか、平行して実験で確かめることにした。この試験は、機械研究所7部に分担していただいた。結果は両者で差がなかった。真空中では、0.5ミクロン程度の大きさのゴミになると、ブラウン運動と重力がバランスし、重力方向になかなか落下しないこと、加えてプラズマ中ではゴミが電荷を持ち、重力よりも、電荷によるクーロン力

の方が大きいためであった。これで、先行した計画が無駄にならずにすんだと胸をなでおろした。そして翌年の86年6月には、要素試作機が完成し、製品試作の計画も順調に進んでいた。しかし、8月になって重大な問題が発覚した。計画していた搬送システムが、他社の申請している特許と酷似していたのである。種々検討したが、どう考えても特許侵害のリスクを回避できないと思った。苦渋の選択であったが、それまでの計画図を全て反故にし、搬送システムの計画を一からやり直すことにした。その日からは、工程挽回のためメンバー全員が連日連夜の必死の努力を続けた。

しかし今振り返って見て、他社特許をしらみつぶしに調べていなかったら、そしてあの時に設計変更の決断をしなかったら、後になって特許紛争で顧客に甚大なご迷惑をおかけした上に、事業撤退に追い込まれていたかもしれず、背筋がゾッと冷たくなる思いがする。

4. 開発なかばで、半導体製造装置ビジネスが廃止プロジェクトとなる

開発が進む一方で、事業環境は悪化の一途をたどり、86年下期、ついに半導体製造装置製品の廃止の方針が出された。2,000m^{2}の組立て室はほとんどが照明を落とし、ただ一個所だけスポットライトのように照らされた一角で、業界にデビューしたばかりのゲート用マイクロ波エッチング装置M206Aがたった一台だけ組立てられていた。半導体部門の設計や、製造部の仲間たちは、武蔵、甲府、高崎、神奈川、小田原などの社内の各工場に、いわば片道切符で次々と出向していった。このプロジェクトは一体どうなるのか、自分自身の将来も含め、部下たちの行く末を心配し眠れぬ夜が続いた。このような状況にあって、6人の仲間たちの目は、かえって生き生きと輝いて見えた。絶対に完成させてやるという執念で、文字どおり寝食を忘れて頑張り続けた。そしてμプロジェクトが発足して以来1年10ヶ月後の翌年87年7月、ついに製品試作機が完成した。製品のコードネームはM308ATと名づけた。

5. 幸運のデビュー

87年8月に入ってシリコンサイクルによる半導体産業の大不況もようやく底を打ち、半導体メーカ各社もメガビット時代の幕開けを予感し、投資のタイミングを図っていた。しかし、我々の装置は生まれたばかりの試作品で、社内といえども、とても量産工場に採用などされるはずもなく、また正規に開発ラインでの評価を受ける手順を踏むと、少なくとも半年以上の期間がかかり、ビジネスチャンスを逸する状況であった。このとき、㈱日立製作所那珂N-1工場の製造部長との幸運な出会いがあった。当時アルミ配線の腐食でご苦労されていたため、アッシャを内蔵するマイクロ波エッチング装置が、配線工程での信頼性を飛躍的に高める可能性があると直感され、いきなり量産工場へ採用することを決断していただいた。開発ラインでの試作実績がないことのリスクを軽減するため、試作機を使って実デバイスでの評価を何度も重ねた。同氏自らもM308ATでエッチングしたアルミ配線のSEM 写真を持って、経営幹部の方々にM308ATを使うべく説得して回られたとお聞きしている。開発部署である武蔵工場からも、300枚以上のウェハを持参しての量産性の事前評価や、多くの装置改善のご指導もいただいた。その結果、試作機に対して200項目にも及ぶ改良・改善を施した製品第1号機を、翌88年3月に無事N-1工場に納入することができた。これを契機に次々と外販に成功し、日刊工業新聞社殿から「88年10大新製品賞」を受賞するなど、エッチングとアルミ配線の防食処理の一貫処理ができる、世界で初めてのマイクロ波エッチング装置として業界ユーザからも大いに注目を浴びることになった。幸運にもこの新製品が市場にタイミングよく受け入れられることにより、当部門の業績は急速に回復し、廃止プロジェクトからの復活を果たしていった。M300シリーズはその後も改良を重ねながら、今日まで750台以上が全世界に出荷され、当社エッチング装置のベストセラー機となるとともに、その後のM500、M600シリーズ開発の礎となった。



メタル用マイクロ波エッチング装置 M308AT

6. あとがき

その後もシリコンサイクルの大波の洗礼を3回も受けることになるが、この時のM308ATの開発を通して学び経験したことが、当部門が厳しい生存競争を乗り切ってきた原動力となっている。事業にも人生にも時の運というものがある。運も実力のうちとよく言われるが、実は運を引き寄せるのは、失敗を恐れぬチャレンジ精神と、どのような状況にあっても最後まで希望を捨てないで、やりとおす執念を持ち続けることではないかと思う。最後に、お手本となったM206Aの開発に携わり、長年にわたってエッチングビジネスの発展に寄与されてきた弊社笠戸事業所の山本則明氏に感謝するとともに、本年元旦に道半ばでご逝去された氏のご冥福をお心より祈りいたします。

開発秘話：プローバ

東京エレクトロン株式会社 特別顧問　井上 準一

■ はじめに

プローバの機能はウエーハに複数個形成された素子を外部テスターに接続されたプローブ・カードと被測定素子のパッドを正確に位置合わせし、接触させた後、テスターによる良否判定に基づき、不良素子には印をつけ、ウエーハ上の全ての被測定素子を検査するためにX/Y/Z軸を逐次駆動する機器である。初期には顕微鏡下で熟練したオペレータが、素子ごとのパッドにプローブ・カードを当てていたが、量産現場では最初の素子パッドとプローブ・カードの位置合わせ後は残りの全素子を自動的に行いたいという要求に応えて、1964年米国のElectroglas社が世界で最初にプローバを製品化した。当時のウエーハのサイズは2インチであった。日本では1960年の後半は3インチへの移行時期であり、この時マーケティングを実施した結果、顧客の要求機能は正しく現在のプローバその物であった。我々はこの結果に基づき、1973年頃に米国の機器メーカーに開発を依頼した。並行して1972年に東京エレクトロン(株)は本格的にウエーハ・プローバの国産化を開始した。以後の2004年現在までの約32年に渡るプローバの変遷は下図を参照されたい。プローバのステージは、x/y軸の位置決め後、z軸を持ち上げ、上方よりプローブ・カードの加重、最大100kg程度の力を受けながら非測定素子のパッドの自然酸化膜を除去し、且つ穏やかに接触させ、電気的接触状態を良好に保たなければならない。テストヘッド、プローブ・カードとの機械的接続が必須であるが、顧客の過去の資産全てと、テスター、プローブ・カード各メーカーの新規製品をも接続可能にしなくてはならないため、制約条件が多く、新しいプローバとして自由に開発設計できる箇所は意外と少なかった。

■ 3インチ化(モデル5500)　1973年～

Electroglas社の2インチ仕様、900Sを使用していた国内顧客は3～5インチへの対応で、特にテスター、プローブ・カード、マーカー等との機械的接続方法の多様化を要望していた。この要望を取り入れた5500は制御系にノイズが誘導励起され、機器の誤動作が度々発生し、顧客に大変ご迷惑をおかけした思い出がある。

■ 半自動化(モデル3300)　1976年～

全体で25枚のウエーハを収納し、1枚のウエーハ測定が完了するごとにカセットへ収納し、次のウエーハを取り出し、オペレータに針あわせの作業を要求する、半自動装置3300を開発した。5500で問題となった電気的誤動作はあらかた解決された。新たな開発箇所はマイクロプロセッサーを使用したz軸の駆動方法だった。これはプローブ・カードとパッドの接触をより完全にする目的で、接触する高さの近辺までは早く、接触後はパッドの自然酸化膜を破り、電極に接触させた後は振動なく、安定した接触状態を保つものである。現在では容易に実現できるが、当時は試行錯誤の連続で開発された。1976年には米国の機器メーカーに開発を依頼していた、オート・プローバ米国製4400が完成し、国内で評価が開始され始めたが、期待ほどに性能が発揮できず、米国製4400の顧客対応に追われた。この時の問題点はウエーハ・アライメントの誤動作、ウエーハ搬送の信頼度不足であった。アライメントにレーザーを使用し、特徴パターンの比較を行う技法を使用したが、アライメントの誤動作はプロセス工程のばらつきが原因で多発した。海外メーカーに改善要求をするも、アライメントミスを起こす当該ウエーハを社外、ましてや海外に持ち出すことはご法度だったため、実際のデータを提供できず、結果として、解決に相当時間を要した。

■ 全自動化(モデル4400A)　1979年～

市場ではメモリーのさらなる量産化に向けて装置の安定供給、信頼性向上、各種プロセス工程に対応するアライメント率の向上が継続して求められていた。そのため、全ての部品を国産化し、各種プロセス、デバイスに対してアライメント率の向上を開発目標としてモデル4400Aを製品化した。4400Aを使用した顧客の次なる要望は1台のプローバに100枚の同一種類ウエーハを収納可能な小型化と6インチ対応、アライメント率と速度の向上であった。

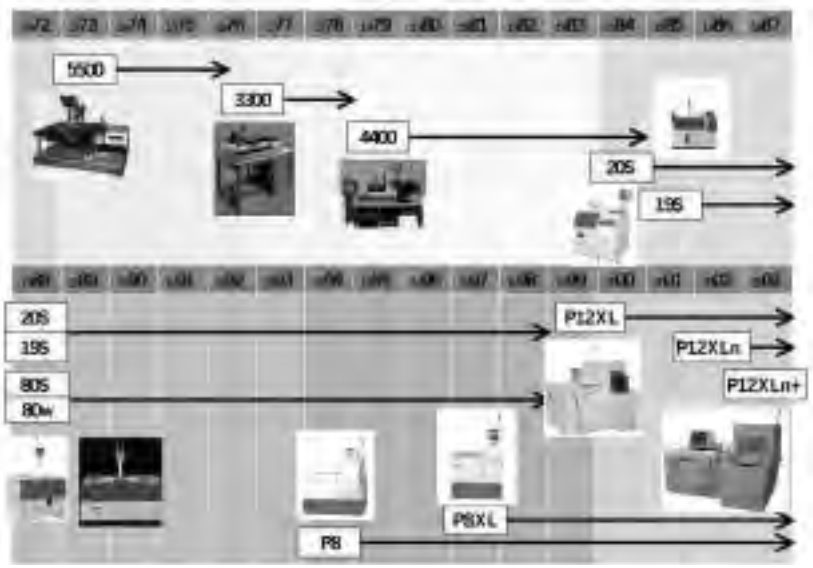


図 TEL プローバの変遷

■ 6インチと小型化(モデル20S) 1984年～

開発テーマの主眼は設計自由度の高い搬送系の大幅な変更、すなわち、ローダーの搬送系をロボット・アームにし、カセット4個を横置きに設置、オペレータのカセット出し入れ用にカセット設置台を引き出し式とし、6インチ、100枚ウエーハ対応で幅1M×奥行0.9Mと大幅な小型化を実現した。その搬送系の信頼性確保、外装板金の精度向上(今までのプローバから一体感のある外装に変更)、アライメントの信頼性向上が図られた。試作機を顧客に見ていただいたときの感触は非常に良く、過去にはなかった数量の引合いが続いた。ただ、初期段階では予期しなかった搬送系の不具合で顧客のウエーハを何枚も破損、もしくはアライメントミスを起こす場合もあり、顧客には大変ご迷惑をおかけした。今でも当時のお客様とお会いして昔話が出る際には、何時もこのことが話題となり、お詫びを繰り返し申し上げている次第である。

■ 8インチと小型化(モデル80S/W) 1988年～

1986年後半から8インチへの移行が始まり、1987年8月に20Sの8インチ拡張版を投入、1988年にはアライメントを今までのレーザーを使用したパターン比較方式から画像認識方式に変更し、汎用性と高速化を図った80Sを市場投入した。同時にメモリーをより効率よく測定するための1ローダー・2ステージの80Wも8インチ市場に出荷した。8インチに移行するのが市場では思ったほどには早くなく、一部の顧客は6インチで使用している状況であった。折から、競合会社が8インチで精度の向上、アライメントにおける画像認識方式の採用、操作性の向上、工場内のテスト・エリアでの集中制御といった機能を備えた新機種を市場に投入し、評価の開始に伴い、高い評価を得はじめた。新規顧客は競合機を採用、今までの顧客からは早期の改善を求められた。分析の結果、競合の性能は当社の現行機種では将来、競合できないと判断したが当時は対応策がなく、大変苦慮した時期であった。

■ 小型化、精度向上(モデルP-8) 1994年～

競合の機種を超える性能と将来の12インチ化も見据えながら、過去のプローバ構造を画期的に変えたい一念で、プローバの目的は何であるかを開発メンバーと再三議論した。決定的な装置方式は得られず、開発の方向付けに困った。そのうち、色々の案が出て、顧客にご意見を伺いに行ったが、市場は日本、韓国、欧州で8インチのメモリー量産が本格的に開始された時期であった。特に6インチ時代までの顧客仕様の操作性、顧客資産(プローブ・カード、テストヘッド等)は全て使用しなくてはならないため、測定品質向上を目的とした、新しい装置仕様を提案しても耳を貸していただける顧客は皆無であった。すなわち、テスト・エリア全体を含めてのプローバを余りにも変える装置は受け入れられないため、再度検討を行った結果、全く新しい考え方のプローバが開発メンバーにより考案され、精度向上、小型化を達成し、しかも多数の装置立ち上げ作業の容易化、将来の12インチ化の実現も容易な装置構成を製品化したが、なかなか新しい装置構成を受け入れてもらえない状況が暫く続いた。なぜなら過去のプローバの装置構成を大きく変えたため、採用にはリスクが伴い、量産採用に疑問をもたれる意見が多かった。しかし国内・国外の各1社に新規装置構成の将来性を評価していただき、多数の採用を決定していただいた時は大変有難く、今でも忘れられない思い出となっている。1996年には大手MPUメーカーの採用が決定し、現在も継続的に採用いただいていることも初期モデルの開発に携わった者の誇りである。詳細は紙面の関係で省略するが、要約すると今までのステージは一つの原点を座標基点として、x/y軸の進捗をモーターもしくはステージの位置をモニターするクローズド・ループ制御を採用していたが、測定するウエーハの在る試料台の座標をウエーハの座標を基準として補正変換する方式を採用したためにステージの大きさを小型化することが可能となった。また、精度向上と12インチ化への対応についても、ウエーハサイズ変更への対応程度で達成可能としたこと、並びにz軸の高さ制御をウエーハ全域にわたってプローブ・カードと確実・均一に接触するような制御を採用し測定品質の向上を図ったこと、多数の装置立ち上げ作業時には測定ウエーハを基準に全ての誤差を補正するので立ち上げが容易となった点などが特徴として挙げられる。制約条件を守りながら、ステージを大きく変えることにより、小型化と精度向上、測定品質の向上を実現したことの達成感は大変大きなものだった。そしてこの構成が以後のプローバの基本となった。

■ 12インチ化(モデルP-12XL) 1999年～

1999年に12インチのP-12XLを海外顧客に出荷した。P-8をベースに測定素子の入出力端子増加に対応してZ軸の強化、プローブ・カードの自動交換、自動研磨等、操作性の向上が図られた。2003年にさらなる精度向上(±1.8μm)、操作性の向上を図った最新鋭機P-12XLn+を投入し現在に至っている。

■ おわりに

1972年国産1号機を出荷して、2004年春までの累積出荷台数は約20,000台を超えている。1972年の5500で針合わせ精度±15μmが2003年のP-12XLn+で針合わせ精度±1.8μmと進化したことに改めて技術の進歩を感じている。プローバの変遷を回顧するに、新製品開発にはタイミングが最も大切と改めて思う。遅すぎては意味がないが、早すぎる場合も、顧客要望を網羅できずに、何度も作り変えが必要となる場合もあり、開発としては成功とは言えない。開発技術責任者は最新技術を先行習熟し、自分自身で顧客要望を直接聞き、新製品投入の時期と仕様を設定することが肝要であることを痛感する次第である。

開発秘話：イオン注入装置

日新イオン機器株式会社 理事　松田 耕自

イオン注入装置は、シリコン基板にn型またはp型の不純物（ドーパント）をイオン注入し、半導体デバイスのゲート、ソースおよびドレインを作る装置である。ドーパントをシリコン基板に注入するだけなら熱拡散法でも可能であるが、イオン注入法の特徴は、注入するドーパント量の定量制御および注入部位の制御が格段に優れている所である。

現在、イオン注入装置は用途別に3種類に分けられ、それぞれ半導体デバイスのゲート周辺部形成のために高精度なイオン注入をする中電流イオン注入装置、ソースおよびドレイン形成のために高ドーズイオン注入をする大電流イオン注入装置、ウエル形成等のために高エネルギーイオン注入をする高エネルギーイオン注入装置である。このうち、当社が現在取り扱っているのは中電流イオン注入装置である。

1. 装置市場参入

当社の中電流イオン注入装置は、幾多の変遷を経てこの種類に的を絞って来たもので、当初から中電流イオン注入装置に目標を決めていたものではない。

当社（前身は日新ハイボルテージ（株））がイオン注入装置事業に参入することになったきっかけは、1970年代当時世界的に著名な加速器製造メーカーであった米国HVE社からの勧誘によるものである。HVE社は、本社で高エネルギーイオン加速器と電子線照射装置を製造し、オランダにある小会社（HVEE社）でイオン注入装置を製造していた。電子線照射装置ではHVE社との間で合弁会社（上記）を作る等、友好関係を築いていたので、この関係を背景に、HVE社は当社に、HVEE社から技術導入することを薦めたものである。

イオン注入装置の技術導入に先立ち市場調査を行ったところ、少数の方からは、注入ドーパントの定量制御ができるから良い技術になり得るとの意見をいただいたが、多数意見は否定的であった。否定的意見としては、イオン注入法で製作される半導体デバイスはノイズが多いと言われた。1973年当時、半導体デバイスの製作にイオン注入法を使うことはまだ充分には普及しておらず、一方熱拡散法が最盛期にあったためでもある。技術導入は、結局、実行することになったが、これは市場調査の結果ではなく、HVE社のアドバイスを信用したからであった。

業務提携を契機に精力的に顧客と接触するにつれ、競合先の装置内容も明らかになり、顧客ニーズと導入技術の間にギャップがあることが判明した。その結果、当初の方針であった導入技術の国産化から、国産技術の開発に切り替えた。

国産技術に切り替えたと言っても、導入技術も要素機器の製作では参考にした。参考例に電磁石の設計がある；イオン源から出たイオンビームの質量分析をする電磁石の磁界制御は、これまで、電磁石コイルに流す電流で制御していたが、導入技術では磁界を計るホール素子で制御するため、電磁石の大きさがコンパクトになった。国産技術は主に装置の自動制御部分であったが、顧客クレーム対策にはことのほか敏感に対応した。クレーム対策の中に英語表示の変更もあった。装置の操作盤に記載されているイオン種区分ボタンの英語表示について、BとPのボタン表示を間違え誤注入するトラブルが発生した時、BとPの表現が誤認されやすいと顧客に指摘された。

当時、国内の半導体デバイス製造メーカーが使用しているイオン注入装置は、ほとんど、米国製の装置であった。このため、デバイス製造メーカーの中に国産技術育成の必要性を考えておられる所があり、当社の自主技術開発に協力していただける顧客と出会えたのは大変幸運なことであった。

2. 橋頭堡（きょうとうほ）（※橋を守るため、その前方に築くとりで）

当社の技術が顧客に認められる契機となったのは、国産技術で複数台の装置製作の実績を重ねるまでになったこともあるが、外国製のイオン注入装置が起こすウエーハのキズ、ゴミの発生問題を解決したことと、150ミリ径基板対応のイオン注入装置をいち早く開発したことである。

当時、海外の中電流イオン注入装置では、シリコン基板の取り扱いはピンセットで行い、シリコン基板をイオン注入室に通すのは、予備真空室から斜め下方に基板を自力で滑らすスライドダウン方法が使われていた。シリコン基板の重量が増すと、この方式では基板がスライド溝の周辺に接触してチッピングを起こしやすくなり、またデバイスの集積度が増しつつあったこともあり、基板のキズ、ゴミ付着が問題視され始めていた。当社は、シリコン基板の機械的摩擦を極力少なくするため、シリコン基板をベルトで水平搬送する方法を採用した。また、150ミリ径基板対応のイオン注入装置は、顧客要求に忠実に応じた。

シリコン基板をベルト搬送する方式を採用したエンドステーションと150ミリ径基板が使用できる中電流イオン注入装置は、当社にとって最初のヒット商品となった。この時期、海外の競合先がシリコン基板のベルト搬送方式を真似ているとの風評も立った。ヒット商品を手中にして、半導体デバイス製造装置事業の

特異性を理解することとなった。即ち、No.1製品のみが適正な利益を上げられるということである。

中電流イオン注入装置で一定の地歩を築いたと思えたので、より大きな市場である大電流イオン注入装置への参入も検討していた所、顧客より、ウエスタンエレクトリック社（後のAT&T社）が長寿命のイオン源を搭載した大電流イオン注入装置を開発しているとの情報を得て、調査のため出張した。事前情報とは異なり、イオン源寿命は普通程度で、イオンエネルギーも30keV程度止まりであったが、自力で改善できる見込みもあり、技術導入に踏み切った。技術導入した大電流イオン注入装置のイオンエネルギーの低さは直ぐに問題となり、200keVまでの増強を余儀なくされる事態となり、30keV装置技術の習得とほとんど平行して、200keV大電流イオン注入装置の開発をした。150ミリ径基板対応中電流イオン注入装置が市場に浸透するにつれ、装置技術開発の増大により開発費負担が大きくなり始めた。そのため、開発費捻出目的も兼ね、HVE社と掛け合い



300ミリ径基板対応中電流イオン注入装置（EXCEED2300）

HVE社製高エネルギー加速器等の輸入販売を開始した。半導体産業の規模拡大気運もあり、一層の業務拡大を目指し、イオン注入装置事業を日新ハイボルテージ（株）から親会社の日新電機（株）に移管した。

半導体デバイス製造用イオン注入装置では、基本原理および主要機能の発祥地は米国であり、装置の市場占有度も米国勢が大半を占めていたが、液晶ディスプレイ製造用イオン注入装置（当社呼称イオンドーピング装置）は、当社が最初に開発し、1988年に完成した。

イオンドーピング装置では、最終製品が液晶パネルであり半導体チップより格段に大きいが、製品の付加価値が半導体デバイスより低いため、装置構成を単純にしなければならなかった。このため、半導体デバイス製造用イオン注入装置に使用しているイオン質量選別機構およびイオンビーム走査機構を削除し、代わりにパネル相当の大面積イオン源を製作し、また不純物の発生を極力防ぐ対策をした。顧客の中には、不純物混入に懸念を表明する方もおられたが、緊密な協議と事前試験を繰り返し理解を求めた。

3. まとめ

イオン注入装置の取り扱い部署が、1999年4月、日新電機（株）から分社した日新イオン機器（株）に移った。日新イオン機器（株）はイオン注入装置専業の会社である。半導体製造装置市場がアジア地区に移りつつある一方、先端技術の自国内復興がなされつつある。イオン注入技術は今後も発展を続けることには変わりないが、イオン注入装置は種々の変革を遂げて行くものと思われる。繁閑のサイクルはこれからも繰り返し到来するであろうが、半導体デバイス製造装置業界の一翼を担い続けたいと思っている。

セミコン・ジャパン 2004のお知らせ

日本経済の本格的な回復基調のもと、半導体・FPD産業を中心とする製造業はじめIT産業の復活は顕著で、電機・情報大手各社の研究開発・設備投資への積極姿勢は軒並み二桁を超える増加となっております。世界全体でも設備増強への積極姿勢は共通しており、今年から来年への世界景気上昇が大いに期待されます。この追風を背景に、セミコン・ジャパン 2004へのご出展社様ならびに展示スペースも増加の傾向にあり、お蔭様にてセミコン・ジャパンの開催規模は、昨年を大きく上回る予定です。

ご出展社様の最新技術・最新製品の展示ならびにSEMI特別企画の準備が進む中、出展スペースにまだ若干の余裕がございます。今からのご出展、またスペースの拡張をお考えの企業様には、SEMIジャパン展示会部にご相談ください。

セミコン・ジャパン 2004

1. 開 催 日： 2004年12月1日（水）～3日（金）
2. 会　　場： 幕張メッセ（日本コンベンションセンター）
1～11ホール、イベントホール
3. 開催規模： 1,500社　4,000小間
4. 問 合 先： SEMIジャパン展示会部　Tel: 03-3222-6022　E-mail: jshowsinfo@semi.org

開発秘話：ポジ型フォトレジスト

東京応化科学技術振興財団 事務局長　浅海 慎五

1. はじめに

ICの製造が始まってから現在まで、ムーアの法則に沿った微細化が進んでいるが、この間フォトレジストはその解像度に応じて選択使用されている。その中で、ゴム系フォトレジストは、ICの製造開始当初からウェットエッチングとの組合せで使用され、これにより、ICの製造プロセスの確立がなされた。ゴム系フォトレジストは、解像限界が2μmのため、3μm（64 kbit DRAM）まで何とか使用された。続くポジ型フォトレジストは、ゴム系フォトレジストに代わって3μmからg線（436nm）投影露光との組合せで使用され、さらにレジストと投影露光の相互改良によってi線の波長（365nm）より細かい0.25μmまで使用されている。現在の微細化は実用的には65nmに達しているが、これらはほとんど化学増幅型レジストによって行われている。

ゴム系フォトレジストからポジ型フォトレジストへの切替えは、解像性の向上のためとプロキシミティー露光や投影露光の進歩に伴い、密着露光におけるマスクとウェーハの密着に伴うマスク損傷によるICの歩留まり低下の欠点を補う形で一気に進んだ。当社のOFPR-800はそのタイミングにうまく合い、当社の飛躍のきっかけとなったので紹介する。

2. ポジ型フォトレジスト開発の背景

当社がポジ型フォトレジストの開発を始めた昭和47年頃は、ゴム系フォトレジストが主流で、ポジ型フォトレジストはマスクの製作やアルミニウム配線など一部の工程のみで使用されていた。また、当時の半導体用ポジ型フォトレジストといえば、Shipley社（米国）のAZ-1350で、現像液には珪酸ナトリウム水溶液が使用されていた。

ポジ型フォトレジストはノボラック樹脂と感光剤（ポリフェノールのナフトキノンジアジドスルフォン酸エステル）で構成されており、Shipley社は当時最もポピュラーな感光剤の2,3,4-トリヒドロキシベンゾフェノン-ナフトキノンジアジドスルフォン酸エステルを電子部品の加工に限定して特許を取得しており、当社はそれに抵触しないようにポジ型フォトレジストの開発を始めていた。

開発を始めた当初は、半導体製造工程のポジ型フォトレジストの本格的使用には半信半疑だったが、昭和50年に超LSI構想によって研究組合が組織化され、64 kbit DRAMの開発に向けて研究がスタートし、ポジ型レジストの使用が現実味を帯びてきた。

ポジ型フォトレジストはゴム系フォトレジストに比べて解像度が良いが、当時のIC製造プロセスに適応できない欠点を持っていた。①その膜は硬くて脆いため、ウェーハとマスクを密着して露光すると欠けが発生し易く、密着露光にむかない。②密着性が弱いのでウェットエッチングでのサイドエッチングが大きい。③現像液にアルカリ金属を含んでいるため、ウェーハの汚染の原因になる、等々があった。

密着露光では、マスクは、数十回ごとに洗浄したり使い捨てしたため、ICデバイスの微細化によってマスクの製作費用が高騰し、ICの原価に対するマスク代を無視できなくなり、マスクとウェーハを密着しないプロキシミティー露光や投影露光が検討された。しかし、プロキシミティー露光や投影露光はゴム系フォトレジストを使用すると露光中の酸素による影響で現像後の残膜率が低下する問題があり、歩留まりの低下をまねいた。そして色々な欠点があったが、解像度が良くて酸素の影響のないポジ型フォトレジストへの移行の必要性が出てきた。

昭和50年代の中頃になると、投影露光装置やドライエッチング装置の商品化で微細化の加速とともにポジ型フォトレジスト化への流れが加速した。

一方、現像液は、昭和50年頃、有機化合物でありながら水酸化ナトリウムに匹敵する強アルカリのテトラメチルアンモニウムヒドロキシド（TMAH）がIBMから技術開示されて、アルカリ金属による汚染の問題は解消された。当社も独自にTMAHを使用した現像液をNMD-3の商品名で上市した。現在もIC製造工程で標準濃度になっている2.38%は、H社のマスク製作用が起源である。

3. OFPR-800の開発

当社はポジ型化への進捗をにらみながらShipley社の特許に抵触しない方法でOFPR-2やOFPR-77など、種々のポジ型フォトレジストを開発していた。その間、超LSI研究組合の終盤には、64kbit DRAMの製造プロセスの開発で、ポジ型フォトレジストの採用が現実のものとなっていたが、認定のフォトレジストはShipley社のAZ-1350であった。

そんな折、金属配線回路を作成するのに有利なリフトオフ法に有効な「クロロベンゼン浸漬法」が学会で発表された。クロロベンゼン浸漬法とは、ウェーハに塗布したポジ型フォトレジストをクロロベンゼンに浸漬法してから露光、現像するとT字型の断面形状が得られるもので、AZ-1350は可能だったが、当社のフォトレジストでは実現できなかった。

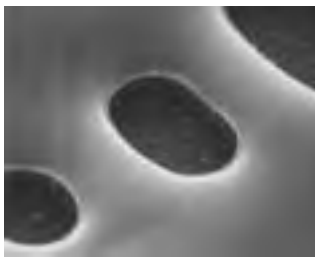
当時ポジ型フォトレジストの開発を担当していた小峰（現 常務取締役）は、Shipley社の特許があと3ヵ月ほどで切れることに気付き、独自に2,3,4-トリヒドロキベンゾフェノンの合成をした。またそのベンゾフェノンとナフトキノンジアジドスルフォン酸をエス

テルとして合成し、ノボラック樹脂と混ぜて感光剤にするとT字型の断面形状を再現することができた。

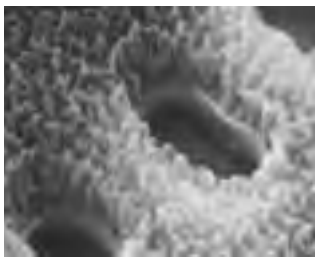
しかし、耐熱性がAZ-1350に比べて10℃ほど劣り、耐熱性の良い新たなノボラック樹脂が必要になった。以前から我々は軟化点の高いノボラック樹脂を探していたが、ノボラック樹脂メーカーから「製造に失敗した」として高分子量で高軟化点の樹脂をこの2ヵ月ほど前に受け取っていた。この樹脂を使いこなすことと、感光剤も独自の製法によって試作を始めると、今までにない特性のポジ型フォトレジストを作ることができた。運が良いとはこのことである。

AZ-1350は現像液が低温では感度が高く、高温では感度が低くなる傾向がある。それに対して現像温度20～30℃の範囲で現像液の温度による感度変化の少なく、25℃で最も感度が高いレジストに仕上がった。また、他社レジストで問題だった段差のあるアルミニウム基板上での密着性が改善されたという結果を受取ることができ、最も使いやすいレジストと認められた。しかし要求は厳しく、いくつかの問題点も指摘された。①表皮剥れ(現像時にフォトレジストの表層が剥れる現象。剥がれた表皮がシリコン基板に付着すると、次工程のドライエッチングにエッチング不良の原因になる)。②段差の境界部分での薄膜残り(段差の境界部分はレジストの膜厚が厚くなるため現像されずに残ったレジストの薄膜が残り、エッチング不良の原因になる)。

当時、当社には投影露光機もスプレイ現像装置もなかったので、これらの現象の再現が大変だった。思考錯誤の結果、ウェーハを斜めに立て掛けて現像液を垂れ流す方法で表皮剥がれを再現することができた。SEM像を観察すると、剥れた表皮の膜厚は露光用光源の定在波の1周期分(0.13μm)と推定された。段差のあるウェーハを用いて薄膜残りの再現を試みたが、密着露光装置では再現できなかった。そこで小峰は、表皮剥れをなくすために、現像時間の60秒間内で、定在波に相当する0.13μm膜、すなわち、未露光部の表皮膜が溶解するようにレジストの設計をし直した。そして表皮剥れや膜残りも一気に解決することができた。このようにしてできたのがOFPR-800である。AZ-1350など他社のポジ型フォトレジストが段差のあるアルミニウム基板上での密着性、表皮剥れや薄膜残りを改善できずにいる中で、OFPR-800は着々と64 k bit DRAM製造用フォトレジストとして採用されていった。また、他のレジストとの大きな違いは分子量の大きな樹脂と高軟化性のノボラック樹脂を使用したため、ドライエッチング耐性が一段と向上したことも採用に向けての大きな特徴であった。



OFPR-800



当時の標準レジスト

レジストの耐エッチング性の比較(レジスト剥離前)

基板:SiO2,500nm	ガス:CClF3
出力:150W	圧力:66.7Pa
基板温度:100℃	装置OAPM-300

4. 肝を冷やしたナイロン事件

一年ほど安定して拡大を続けたある日、T社から製造工程での歩留まりが急落し、原因がレジストにあるらしいとの連絡を受けた。OFPR-800需要が急速に立上がって在庫が取れなかった状況から、ようやく少し取れるようになった矢先のことであった。ウェーハに塗布して顕微鏡で観察すると0.5～数μmの丸い異物(パーティクル)がウェーハ全面で確認された。パーティクルが微細であるため大量の製品をろ過してフィルター上の粉末を集めて分析してみると、ポリアミド(いわゆるナイロン)だった。ポリアミドとノボラック樹脂では接点がないのでびっくりしたが、調査の結果、原料のノボラック樹脂が原因していることが分かった。早速、原料メーカーに問い合わせると、粉砕機をノボラック樹脂とポリアミドに共用したとのことだった。

ナイロンの分子量測定用の溶剤としてクレゾールが使用される。原料のノボラック樹脂は10 %程度未反応のクレゾールを含んでおり、粉砕中に発生する熱で、残存するポリアミドがノボラック樹脂に溶け込んだものと推定された。当社のOFPR-800は製造工程でクレゾールが除去されるため、クレゾールを介してお互いに相溶性を維持していたノボラック樹脂とポリアミドが、相溶性を維持できなくなり、製品として倉庫で保管されている間にポリアミドの分子同士が集まり粒子に成長したものである。原因が分かるまでは危機的な状態であったが、ユーザー様には早期に原因と対策を報告しご理解いただき対策を実行したことによりこの危機を乗り越えることができ、ほとんどの半導体メーカーで採用され、一時期フォトレジストのデファクトスタンダードの位置を確立した。

5. OFPR-800開発のタイミング

OFPR-800は決して解像性の良いレジストではないが、64 kbit DRAMのデバイス寸法がステッパの解像限界より大きかったので、全く問題なく使用することができた。そしてその後、投影露光の性能向上とも相まって1M bit DRAMまで約10年近くポジ型フォトレジストの主流の座を占めることができた。また現在このレジストはLCDのTFT用形成のために、これらの知見を生かして若干の改良を加えた上でG線レジストの原形となっている。

開発秘話：300ミリ シリコンウエーハ

三菱住友シリコン株式会社 顧問　京極 哲朗

1. はじめに

三菱住友シリコン（株）は、直径100ミリから300ミリまでのシリコンウエーハを、世界の各拠点で製造し販売している。その中でも、300ミリはテクノロジーノード90～65ナノメータ以降の微細化をターゲットとして、精度、品質面のさらなる高度化と低価格化の要求が厳しい製品である。需要もワールドワイドで足元の60万枚/月強の水準に対して、来年は50%を超える勢いで伸びていくとの見方もあり、200ミリの場合と同様に速い速度で量産展開が進んでいる。このように、300ミリはお客様の工場立ち上げが追い風となり急成長しているが、過去を振り返ると必ずしも順風満帆ではなかった。200ミリの面積比2.25倍という、当時としてはとてつもなく大きなウエーハの開発を本格的に開始したのは1995年、ちょうど日本でバブルが弾けた後であった。その後、幾度となく景気の壁にぶつかったが、SEMIをはじめ業界が一丸となり標準化を推し進めてきたこと、そして絶対に事業化するという強い執念が、それらの壁を乗り越える原動力になったことを、今でもはっきりと覚えている。

2. 標準化の動き

過去のウエーハ直径の移行期には、ウエーハおよびデバイスメーカー各社が個別に最適化を図ったため、数多くの仕様が存在していた。したがって、1994年サンフランシスコで開かれたシリコンウエーハサミットで、次世代のウエーハ直径を300ミリとすることが決定され[1]、標準化について積極的に協力し合うことが合意された意義は、非常に大きいと考えている。このことは、競争力に直接結びつかない事項について標準化することが、開発費や設備投資額の大幅な上昇を避けるのに有効であると判断した結果であり、両面共に研磨することが標準化されたのも確かこの時期であったように記憶している。

また、300ミリ用のデバイス製造装置ならびに材料の評価を共同で実施する計画も立案され、米国にI300I、日本にSelete（半導体先端テクノロジー）が設立された[2]。そして、装置に適合したウエーハ、ウエーハに適合した装置というように、関連業界が相互に諸課題を認識しながら開発が進められるようになった。半導体業界における競争力の構造変化を肌で感じた時期である。

3. 高品質・低コスト300ミリウエーハへの挑戦

ウエーハの直径がまだ300ミリと決まっていない時期に、200ミリ試作装置を改造し、300ミリの試作を開始した。当時はルツボが小さく原料のチャージ量も少なかったため、トップ、直胴、ボトム部がほぼ同じ長さの結晶となり、無転位化にも苦労した。ウエーハへの切断は、内周刃装置で二度に分けて行い、できた段差を研削装置で仕上げた。研磨工程では200ミリ用の装置のヘッドを改造し表裏2回の研磨加工をする方法を採用した。試作したウエーハの精度に関しても300ミリ用の装置がなかったため、自前で簡便な測定器を作るほか、200ミリに加工して評価する等ということも行った。このようにして試作したウエーハをお客様のところに持って行き、300ミリ化の動向を伺ったり、問題点を指摘していただいたりしたことが、つい昨日のような気がしている。

1995年に本格的な開発組織を設立し、試作棟を建設して結晶～加工～エピ各プロセスの試作機を順次設置した。開発に当たってはデバイスの微細化に対応した高品質化を目指すのは当然であるが、資材費の削減や生産性の向上を狙った効率的なプロセスの構築にも積極的に取り組んだ。以下にその挑戦の内容を2、3紹介する。

（1）200ミリ結晶との歩留比較から、300ミリには300kg以上の大重量結晶を引き上げる必要があり、従来の種結晶に絞りを入れた細いネックでは不可能と考え、独自の大重量結晶保持装置の開発を進めた。これは、細いネックの下にノブ（こぶ）をつくり、その部分を掴んで引き上げるという方法である。ノブの作成方法、掴む装置および掴んだ後の引き上げシーケンス等を開発し、耐久性も確認して初期の実用炉に設置した。しかし、その後の操業で従来の方法でもある程度の重量を安定して支え得ることがわかり、実用炉に全面適用されることにはならなかった。今後、さらなる大重量の結晶引き上げが行われるようになれば、必要となる技術・装置であろう。



300ミリ結晶

（2）結晶の安定成長に関しては、大口径石英ルツボの開発もまた避けては通れない。大容量のシリコン融液を長時間保持するので、融液と

の反応によるルツボ壁の浸食や変形が、結晶品質に大きな影響を与える。また、結晶製造費用の中でルツボの占める比率は小さくなく、その長寿命化も必須であった。メーカーとの共同開発により、実用に耐える品質のルツボが開発でき、結晶の量産化が可能となった。

(3)加工における最重要課題は、デバイスの微細化(当時のデザインルールは0.18ミクロン)に対応できる高精度ウエーハを低コストで製造する技術の確立につきる。200ミリまでは対応できた片面研磨も、0.18ミクロン以下の微細化に対しては限界があると考え、自動両面同時研磨装置の開発に着手した。ウエーハの研磨装置への出し入れをはじめ、両面研磨加工に最適と考えられる前後の加工プロセス等についても、装置メーカーを選定して双方の技術者が互いに知恵を絞り出しあって開発をすすめ、両面研磨機を中心とする加工ラインの基本構想を構築することができた。一方、300ミリの平坦度やパーティクルを測定する装置の開発にメーカーが難渋していた。このため、ウエーハ開発と評価装置開発が併行して進行するという状態が続き、開発した技術でどれほど品質が向上したのか、その効果を確認するのに時間がかかることもあった。

4. 本格量産へ

試作棟で日夜悪戦苦闘している間に、デバイスメーカーの300ミリ量産工場の建設が現実的となり、1998年1月 300ミリウエーハの量産工場建設がスタートした。工事は順調に進行していたが、突然の不景気で中断せざるを得ないという、苦渋の選択をすることになった。量産化に関しては技術のリスク、時期のリスク、量のリスクが考えられるが、建設時期のタイミングの難しさを、身をもって実感した時であった。

1999年9月、三菱マテリアル(株)、三菱マテリアルシリコン(株)と住友金属工業(株)シチックス事業本部との共同事業として、300ミリウエーハの生産会社が設立された。同時に両社の技術者が米沢事業所(山形県)と伊万里事業所(佐賀県)に集結され、その開発や量産技術の加速が可能となった。両社で個別に進めて来た技術開発、装置開発の中から最良のプロセス、装置を選択することで、品質面、生産面で世界に冠たる量産工場が出来たと思う。また、建設を中断している間にもデバイスのテクノロジーは進んでいたが、ITRSのロードマップをベースに独自で一世代先行のロードマップを作り、開発を進めていたお蔭で、本格量産工場をスムーズに立ち上げることができたと自負している。

現在、300ミリの需要は旺盛で、生産量が予想に違わず伸びている。生産を続けながら、建屋増設や設備の搬入、据付をしなければならない状況で嬉しい悲鳴をあげているが、このような時においても、シリコンサイクルの動きを冷静な目で見ることを忘れないように心がける必要があろう。

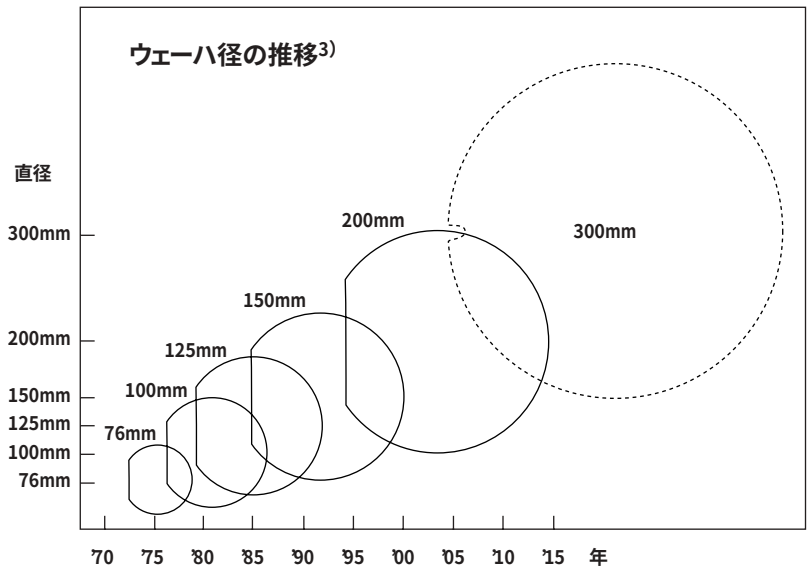
5. おわりに

300ミリの技術開発は、苦労はしたけれども確実にその成果が実り、極めて順調に生産が進んでいる。同時に、デバイス技術の進化により、ウエーハに要求される品質はますます厳しくなってきている。お客様が望む品質をタイミングよく供給し続けるために、お客様の声に耳を傾け、先行した技術開発や量産展開を図っている。また、デバイスメーカー、装置メーカーそして材料メーカーが技術面の協業体制を築き、全体最適を追及していくことが、今まで以上に重要となってきている。

一方、新しいウエーハ製品の開発も、手を緩めることはできない。デバイスのリーク電流低減や移動度向上の要求から、SOIや歪Si他の新材料開発が急務である。また、ITRSのロードマップによれば、直径450ミリというさらに大きなウエーハも予測されている。技術開発はますます難しく、解決に時間がかかるようになろう。技術者にとって今は願ってもない時であり、何事にも臆することなく、実現の可能性を信じ、将来に向かって突き進んでほしいと願っている。

＜参考文献＞

1)SEMIジャパン:グローバルスタンダードへの挑戦 (2003.5)
2)SEMIテクノロジーシンポジューム96(1996.12)
3)H.Tsuya : Jpn.J.Appl.Phys,Vol.43,No.7A(2004)



開発秘話：特殊ガス

ジャパンファインプロダクツ株式会社 専務取締役　秦 裕一

1. はじめに

私は東京オリンピック後の昭和40年（1965年）日本酸素株式会社（現大陽日酸株式会社）に入社し、特殊ガス工場に配属された。当時の特殊ガスは、溶接用アルゴン、熱処理用の混合ガス等が主体であり、半導体用ガスは極少量研究用に供給していた。しかし、シラン・ホスフィン・ジボラン・アルシン等の水素化物、三塩化燐等の塩化物の混合ガスもあった。機器分析もガスクロマトグラフィー・分散型赤外線分光光度計位で化学分析を行い、分析値を出すのに苦労したのが懐かしく思い出される。半導体用ガスはガスメーカーとしては受身の形であり、このようなガスができないかという半導体メーカーからのニーズに対応し、しかも結果については、半導体メーカーで製造し良否が判明するという非常に取り組み難い商品である。

しかし現在、国内市場規模は2003年で約350億円（特殊ガス工業会集計）という産業に成長したので、半導体用ガスの黎明期より製造に携わった関係で、今までの纏めの意味で過去の経験を述べさせて戴きたい。

2. 特殊ガスの技術

当社の主体はブレンダーという位置付けにあり、材料ガスそのものを合成するケミカルメーカーではないため、材料ガスは購入しベースガス（N_2、Ar、He、H_2）で希釈し、使用しやすい混合ガスを製造するか、用途にあった荷姿に小分け充填し、供給を行う特殊ガスメーカーである。

したがって、ユーザーニーズに合致した品質のガスを、安定的に、保証期間内では変化しないで、保安に問題を起こさぬよう、低コストで供給する責務がある。

このために必要な特殊ガスメーカーとしての基本的な技術は次の通りである。

①供給荷姿技術（容器、容器弁、カードル、大型容器等含む）

供給容器は0.35Lから3.5L、10L、40L、47L、48L、480L、と種々あり、材質もMn鋼、ステンレス鋼、アルミニウムが使用される。これらを需要量に合わせガスの品質維持をみて選定する。

②容器処理技術

容器は作成時熱処理加工するため内面が汚染されており、清浄化する必要がある。

③混合技術

混合ガスを要求値どおりの範囲内で製造するための技術。

④混合安定化技術

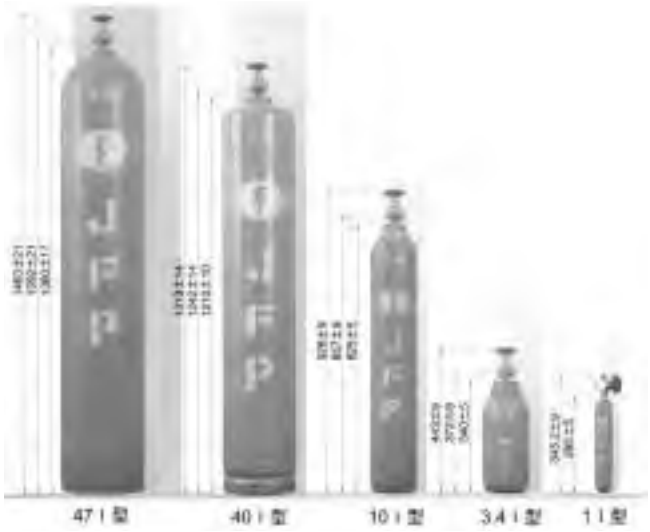


図-1 特殊ガス 容器荷姿



図-2 大型容器荷姿

混合ガスを製造する時、短期間にガスを均一に混合させる技術。

⑤品質管理技術（分析技術含む）

現在では半導体用ガスの特定不純物はppbまたはpptオーダーの分析が要求されており、対応する技術が必要である。また、混合ガスの場合は混合比率を正確に分析する技術も必要で、基準値をつくることも重要な要素となる。

⑥保安技術

高圧、可燃性、自然性、毒性、腐食性等の危険性を有するガスを取り扱うため、ユーザーも含めた安全に取り扱う技術が必要である。

3. 容器処理技術

特殊ガス製造の独自技術は何といっても容器処理技術と思われる。これは容器製造時に容器内部に付着する油、錆び等の

汚染物質を、容器の30mm位の口より取り除く技術が基本となる。しかし錆びのみが原因ではなく、容器内面が適切に処理されていないとガスの純度に種々の影響を及ぼす。
考えられるガスが変化する要因は次の通りである。

①錆び

容器内面に錆びが残存すると還元性ガスは反応し水分が増加する。水素やアルシン等を製造すると顕著に見られる。

②容器内面への吸脱着

反応性ガスは特に容器内面との吸脱着がある。濃度の薄い混合ガスを製造すると減少し、濃度の濃いガスを製造した後薄いガスを製造すると増加することがある。錆びが存在すると顕著に起こる。

③内壁の触媒作用

過去、H_2-C_2H_4混合ガスを製造したら、C_2H_6が大量に検出された。鉄が触媒作用をしたものと考えられ内壁の不活性化が必要となる。また、ジボランのように自己分解性を持つガスも内壁の処理である程度反応が抑えられる。

④容器内面との反応

微量の酸素混合ガスは容器内面と反応し、濃度が減少する変化を起こし、ジエチル亜鉛混合ガスをアルミニウム容器に製造すると、ガス中にアルミが検出される。
容器処理技術とはこれらの要因を内面のクリーニング、特殊な化学処理、メッキ、グリースの塗布、容器材質の変更(容器はマンガン鋼、アルミニウム、ステンレス鋼等が市販されている。)によりガスの変化を抑える技術である。

4. 容器処理の開発

昭和50年当時、特殊ガスのうち自動車の排ガス測定ガスが大幅に増加し、その中でも窒素酸化物を測定する基準となるNO-N_2の低濃度標準ガスが要求された。当時当該標準ガスは容器処理が確立されておらず、経時変化(時間とともに濃度が変化する現象)が起こり、特殊ガスメーカー挙って技術の確立を競った。
当社は錆びの除去に酸による洗浄で酸化鉄を溶解し取る方法を採用しており、容器個体差によりバラツキがあり、経時変化のない容器を選別して使用していた。したがって濃度変化が起こっているとのクレームも多く、対応に苦慮していた。ユーザーより(自動車のピストン・シリンダーのような磨かれた容器があれば変化はないだろうに)等と言われたが、当時は夢のような話であった。
現在では、容器メーカーよりクリーン容器として容器内面粗面度1Sが市販されており、半導体用ガスでパーティクルフリーのクリーン仕様容器として使用している。夢の実現となった。
上司よりNO-N_2低濃度の標準ガスの容器処理を見直しバラツキをなくすようにとの指示を受け、部下1名と改良に取り組んだ。
容器処理の手順は次の通りである。

1 容器内面検査
2 酸による内面の洗浄
3 スチームよる残存酸の洗浄
4 窒素による内面乾燥
5 バルブ装着
6 容器加熱真空
7 窒素封入

2項の酸と6項の加熱真空に主に着眼し、酸を新しくし加熱真空引装置の温度と時間を最適とする実験を行い、良品ができあがった。
実験結果を報告し予算をとり、酸洗浄の装置と加熱真空引装置を設置し、当時ではかなりの設備投資を行った。しかし、設備投資後テストをすると良品ができない。設備投資前のバラツキでなく、全数駄目な結果となった。
実験計画をたて原因を追求、酸濃度を変え、加熱温度と時間を変え、封入窒素の高純度化と封入装置を工夫し実験したが、良品はできなかった。
約6ヵ月実験を繰り返し、上司より苦言を聞かされたが、ある時容器処理業者の担当者が、前は封入窒素に市販の低純度窒素を使っていたが関係ないだろうかと言って来た。関係ないだろうが、やる実験もなくなり片手間に試してみた。
ところが驚くことに明らかに実験結果は良くなった。
低純度窒素は50ppmもの酸素を不純物として含んでいた。この酸素がエッチングされた鉄肌と反応し不活性膜をつくりNOとの反応や吸着を抑えたものと考えられる。原因は解明され、それ以後経時変化のない処理は確立し特許をとった。肩の荷はおりたが、何となく自分の知識のなさが反省され、釈然としない気持ちであったのが思い出される。

5. 終わりに

「若い時関係した開発」といえるかどうか分からないが、経験を書かせて戴いた。結果として当時実施した実験が、標準ガスだけでなく容器の内面洗浄技術という意味で半導体用ガスの容器処理に現在でも応用採用されており、役に立つ開発であったろうと思える。当時を思い出すと約6ヵ月間一生懸命取り組んだことが懐かしく思い出される。
何時の間にか、若い人に「何事も諦めず取り組めば何処かで道は開ける」と教訓を垂れる人生の先輩となってしまった。
最近では、半導体用ガスに480Lとか500Lという大型容器が採用され、単体ガスでの供給が主流になってきているので、大型容器のパーティクルフリーで水分を少なくする処理の開発が主体となってきているが、客先ニーズを咀嚼し、その実現に向かった開発を後輩にも続けてもらいたい。

開発秘話：ウエハー 搬送ロボット

タツモ株式会社 取締役 システム機器部長　仕田原 仁志

1. はじめに

タツモ(株)は、岡山県の西部に位置する自然環境に恵まれたのどかな町、井原市に本社を置く半導体・液晶製造装置、精密金型の設計・製作・販売を主業務とするメーカーである。当社は、1972年に関連会社の企画推進部門から設計担当者3名で独立し、スタートした。当時は、設備の保守・省力機器の開発を主業務としていたので、さまざまな自動化装置を手がけていた。その中の秀作にウエハー搬送ロボットを手がけるキッカケとなったレジスト塗布装置があった。この装置なくして現在のウエハー搬送ロボットを語ることはできない。

2. レジスト塗布装置の開発

当時の半導体製造装置は、ほとんどが外国製の装置で、価格が高く・部品入手が難しく・サービスが悪いということで、多くのデバイスメーカーでは国産化もしくは内作化を進めていた。取引先のデバイスメーカーでもできれば国産のレジスト塗布装置を購入したいということだったが、いろいろ調査をした結果、要求される仕様を満足する適当な装置がないことがわかり、取引があった当社に装置の開発の依頼があった。半導体関連は今後大きく成長する産業であるとの判断で、装置の受注を決断し早速プロジェクトを発足し開発に着手していった。1979年のことだった。

当時参考にしたのが米国GCA社のウエハートラック。ウエハーの搬送をエアーを噴出して行う独自の構造で、当時の最先端のレジスト塗布装置だった。最初の試作機はこのエアーベアリング搬送を採用して開発を行ったが、ウエハーのガイドへの衝突による破損・ベーク部での張りつき・発塵等多くの問題を発生し、設計変更も何度となく繰り返した。それでも、何とかその年の暮れに装置を完成させ納入した。しかし、納入してからもランニング運転・プロセス条件出し等で次から次に問題が発生し、徹夜の連続で対応していった。そして約半年間の悪戦苦闘の末、やっと装置を引き渡すことができた。

『艱難辛苦汝を玉にす』といわれるように、このときのユーザーからの苦情処理、要求への対応など、生みの苦しみともいうべき経験は、すべてその後の技術や装置開発・販売に多大な影響を与えていったと考えている。

3. セミコン・ジャパン 1980への出展

この装置がユーザーで評価を得、タツモは半導体装置業界に参入する決断をした。1980年には、この試作機をベースに改善を重ね、全自動レジスト塗布装置“TR4000シリーズ”を開発、セミコン・ジャパンに出展し販売を開始した。この装置は、エアーベアリング搬送に加え、ベーク部の搬送にウオーキングビームを採用し、コンパクトUターン構造の当時としては画期的な装置で、展示会では初日から大好評でいつも黒山の人だかりだった。

翌年には全ての搬送をメカ式で行うスピンコーター“TR5000シリーズ”を開発し販売を開始した。当時のウエハー搬送はOリングベルト搬送・エアーベアリング搬送がほとんどだったが、より確実でクリーンな搬送が求められており、タツモはこの要求に応える装置として、メカ式搬送を全面的に採用した装置をいち早く開発した。この“TR5000シリーズ”と、後に6インチ対応装置として開発した“TR6000シリーズ”(写真1)はトラブルが少なく、パーティクルフリーということで、タツモのヒット商品となり600台以上の販売実績を残すことができた。

4. 搬送ロボット事業への参入

1980年代は、デバイスメーカーの方と一緒に装置を開発することが一般的で、タツモも積極的に共同開発を行っていた。その中で特に記憶の残っているのが、F社の依頼で行ったステッパー用プリアライメントユニットの開発だった。この開発は米国のステッパーメーカーGCA社のプリアライメントユニットを国産化するというもので、スカラ型ロボットとレーザー式アライメントを量産機で最初に採用したユニットだった。開発時間がほとんどない

写真1　TR6000シリーズ



中での依頼で、仮眠のため寝袋持参で作業をしたのだが、パーティクルフリーと精度の大幅な向上・確実な搬送を実現し、F社の全プリアライメントユニットを乗せ変え、さらにGCA社の標準ユニットとしても採用していただくことができた。このユニットも数多くの出荷をすることができ、タツモ飛躍のステップとなっていった。当時、ソニーの「ウォークマン」がヒット商品となっていたのを覚えている。

1985年には、このスカラ型ロボットとレーザー式アライメントを搭載したスピンコーター“TR8000シリーズ”を発表し販売を開始した。この装置は4インチ～8インチのウエハー・マスクを部品変更しないで全自動で搬送する、当時としては画期的な装置だった。この仕様もデバイスメーカーの方からいただいたのだが、従来のエアーベアリング搬送・Oリングベルト搬送・メカ式搬送方式では装置化することができず、新たな搬送方式が必要になった。このとき開発したのが、スカラ型ロボットを搭載した走行軸を持つロボット搬送システムである。また、どのサイズのウエハー・マスクでも自動認識し位置合わせをする非接触のレーザーアライメントユニットである。このロボット搬送システムとアライメントユニットにより、コンパクトで高速・正確でパーティクルの少ない、しかも搬送の自由度が大幅に向上した理想の搬送システムを完成することができた。この装置は1986年のSEMICON Westに出展し、注目をあびたが、時代を先取りしすぎたのか、ヒット商品にすることはできなかった。翌年のSEMICON Westでは、類似したロボット搬送システムが出展されていた。これ以降、ロボットを使用した搬送システムが目につくようになり始めた。1986年には半導体業界も急成長を遂げていたが、日本経済も、バブル時代へと進んでいたのである。

5. ウエハー搬送ロボットの販売

ウエハー搬送も今後はロボットが主流になるとの思いで、1987年“TR8000シリーズ”で使用したロボット搬送システムを基に、本格的にロボットの商品開発に乗り出した。

最初に市場に出したのがHTシリーズである。このロボットは、半導体製造装置の中で人間の手のようにウエハーを搬送するとのコンセプトで開発した。コンパクトなロボットにすることで、装置レイアウトの自由度を上げ、使いやすいものにしようとしたのである。ロボットの完成度は高く好評であったが、販売体制とかメンテナンス体制等の環境整備がうまく進まず、思うように売上を上げることはできなかった。また、ロボットの誤動作が発生し、なかなか直せず顧客にご迷惑をかけた苦い思い出もある。

その後CTシリーズを経て、STシリーズ(写真2)を開発した。ウエハーサイズの大型化に伴いロボットへの要求も次第に厳しくなり、HT・CTシリーズの問題点を改善すると同時に制御システムの標準化も計り、汎用性と拡張性を大幅に増したウエハー搬送ロボットを市場に投入した。このころから、少しずつ引き合いが増え始め、ロボットが事業として成り立って行き始めた。



写真2 STシリーズロボット

このSTシリーズはその後も改良を重ね、850台以上が全世界に出荷され、当社ロボットのベストセラー機となるとともに、現在の主力ロボットであるMTRシリーズ、MTSRシリーズ開発の基礎となった。

6. まとめ

ウエハー搬送ロボットは世代を重ねるごとに、その重要性が増している。今後もこの傾向は変わらないだけでなく、ウエハー搬送ロボットメーカーの責任範囲はさらに広がってくると考える。当社のウエハー搬送ロボットは記述した通り、社内ニーズにより生まれた産物である。だからこそ現場のニーズをいち早く掴むことができ、タイムリーに製品を開発し続けることができたと考える。今後もこの経験を大切にして“顧客ニーズをどこよりも早く掴み、製品化する”ことに力を注ぎ、製品を開発していきたい。そして、顧客の求めるウエハー搬送ロボットメーカーへの期待に応えていき、これからも半導体製造装置業界の一躍を担い続けたいと考えている。

開発秘話：クリーン環境の創造

三機工業株式会社 エンジニアリング事業部 営業部長　長谷川 勉

1. はじめに

半導体を代表とする微細加工環境として、クリーンルームは不可欠な存在である。

三機工業は、クリーンルーム建設に40年以上たずさわり各分野における製造・研究等の技術を支え、その発展に寄与してきた。私が三機工業に入社した1975年ころは、「超LSI技術研究組合」が立ち上がってきて、日本の半導体が実質的にスタートしていった時期であった。クリーンルーム関連の開発に関して、各時代でいろいろなシステムや、機器・装置を考案/採用してきたが、基本的には半導体製造技術やその市場の発展に追従、対応させていった感があり、以下では私共がその時々に必死で模索した過程全般について述べさせていただいた。

2. クラス100

クリーンルームも当初は、HEPAフィルタを空調の吹出口に設置したいわゆるコンベンショナル（乱流）スタイルであった。クラスで言えば、10,000～100,000であろうか。そこに、ついにクラス100のクリーンルームが誕生する。米国連邦規格（Federal Std.209b）の時代であるから、対象粒径は0.5μmであったが、当時としては大騒ぎであったようである。209bのクラスは、基本的にクラス10,000と100だけに2分されている。これは、現在でも同様であるが、クリーン環境を創るメカニズムとしては、

①きれいな空気を送り込んで汚染空間を希釈する

②無塵空気の押出し流れの中を直接対象空間とする

の2方式以外にないということを示している。

クラス100を創る②は、それまでの空調設備にはないパターンであり、相当の混乱があったものと想像される。HEPAフィルタを天井全面に設置して、清浄空気を吹出し、それを床全面で吸込む訳だが、簡単なようでこれが意外と難しい。まず、斜流の問題がある。実際にパーティクルカウンタで測定をした方なら実感されていると思うが、この層流（一方向流）型のクリーンルームは、天井から吹出された清浄空気がそのまま床に落ちて初めてその大きなパワーを生じる。現在のように床下が高くない状況では、部屋の片側にある循環ファンに引っ張られずにきちんと全面に均等に吸込ませるのは、至難の業である。床パネル一枚一枚にフィルタを付けたり、調整用のシャッターをノギスで設定したりと地味な作業が続いた。今でも、後工程のエリアを前工程に無理に改造すると、当時を思い出させてくれることもある。また、空気を循環させる送風機も、通常の空調設備の30～40倍の容量が必要であり、その設置場所（機械室）も一苦労であった。特に奥行きが長くなると空調機をタテに並べたり、重ねたりと大変なことになった。HEPAフィルタを設置する天井フレームも、トイ状のアルミ型材の中に水封効果を持つシール液を張るために、高い精度を持って吊り込む必要があり、レベルチェックはフレーム部材のリークテストも兼ねて水を満たしていった。もちろん、わずかでもレベルが狂うと水が溢れ落ちてきたものである。このようにして誕生したクラス100のクリーンルームも、もういくつかは既に改修されているのは、少し寂しいものである。

3. 集積度競争とクリーンルーム

DRAMの集積度競争を意識し始めたのは、90年前後であったかと思うが、それにつれてクリーンルームの仕様（清浄度）もどんどん上がっていき、米国連邦規格が各ユーザー規格に完全に追い抜かれていった。

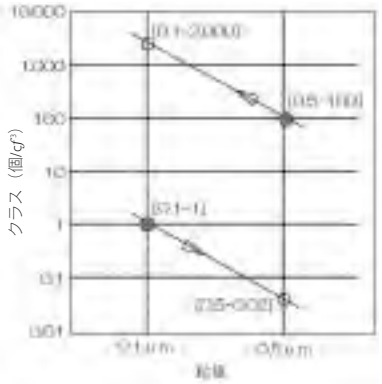


図1　塵埃粒径とクラス（粒径分布）

大気中の塵埃は、その粒径と個数に相関があり、悪いことに小さくなると数が多くなっていく。図1に塵埃粒径とクラス（個数/立方フィート）の関係を示しているが、[0.5μm－クラス100]の空間も対象粒径を0.1μmにすると、[クラス2,000]になり、反対に[0.1μm－クラス1]の雰囲気は、0.5μmの塵埃に対して[クラス0.02]になる。このようなクラスの変化の中で、天井フィルタがHEPA（高効率フィルタ）からULPA（超低透過率フィルタ）に変わっていった。また、一般の空調システムでは“新鮮外気”といって、外気を導入することが室内の“清浄感”を向上させていくが、クリーンルームでは塵埃のレベルの6桁以上も多い外気が最大の外乱となってくる。そこで外気処理にHEPA/ULPAフィルタが使用され、室内の清浄度は文字通り桁違いに上がっていった。さらに、気流の乱れを少しでもなくすために、スピーカーを柱に埋め込んだり、照明ランプに流線型のカバーを着けたり、最後には50mmの天井フレームの幅を40mmにしていった。まさに、集積度競争のクリーンルーム部門といった感じで、新工場が計画される度に、仕様がエスカレートする思いであったのを憶えている。

4. FFUの登場

90年代に入ると、クリーンルームの構成に画期的な変化が現れた。FFU（ファンフィルタユニット）の登場である。むろん、以前にもいわゆるファンとフィルタを組合せたユニットは存在し、クリーンブースなどに使用されていたが、システム天井全面に設置するタイプが出てきたのがこの頃である。それ以前の大型循環ファンに取って代わるべく現れたが、当初はあまり良い評判ではなかった。

・単価が高い（特に台数が多い場合影響大）

・消費電力が大きい（同上）

・動力点数が多過ぎて保守性が悪い
・生産エリア直上に駆動源があるのは感覚的に不可
などである。しかし大量に製作されることで単価が下がり、小型モータの技術改良や同期モータ(DCブラシレス)の採用などで消費電力も激減した。そうなると、設置スペース(機械室が不要＝生産エリアの拡大)や騒音レベルなど有利な点が見直され、もはやビックファン方式には戻れなくなっている。今後、電磁波制御や防爆仕様等の関係でFFUが使えなくなった場合、前述したような広大な機械室を復活させる訳にもいかずにと、秘策を練っている。

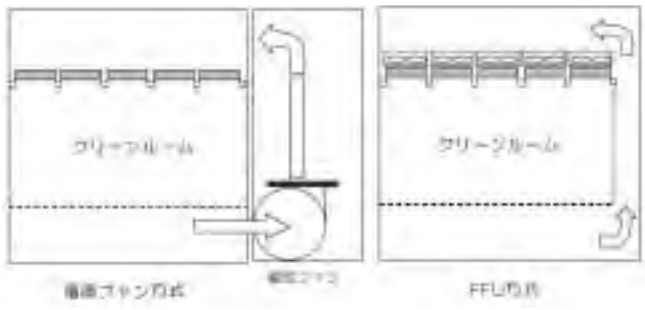


図2 空気循環方式の比較

5. 垂直立ち上げの荒波

クリーンルームの性能競争の後に待っていたのは、厳しい工期短縮であった。できるだけ早期の生産開始が、ユーザーのグローバルな競争力に欠くことができず、垂直立ち上げから瞬間立ち上げにその勾配が、どんどんきつくなっていった。さらに、建築躯体工事が終わる前にクリーンルーム工事に着手し、クリーンルームが完工する前に搬送装置をはじめとする生産装置が入ってくるのが現状である。我々が少しでも油断したらとんでもないものができると緊張の連続である。

ところで、クリーンルームの建設は躯体を除き、大きく3つに分かれている。まず、クリーンな空気を作る空調と、生産装置用動力源のユーティリティと、それらの環境を包む内装である。前2者は比較的従来からの技術の応用で対応できるが、クリーンルーム用の内装はそれまであまりない業種であり、その割に工期的には非常に支配的であった。そこで私共は、この内装システムの内製化を試み、現在では天井フレームをはじめ、パーティションやアクセス床構造など“早くて、安くて、強い”を目標に実績を積んできた。天井フレームやパーティションのアルミ型材は、全て自社設計のオリジナルであり、剛性を自由にアレンジし、工法を簡略化できるばかりでなく、ビスやシール材を極力使わないため、部材の再利用が可能でフレキシビリティにも富んでいる。これが、専門業者のいない海外でも日本国内と同等の品質を保つのにずいぶん力を発揮した。まだまだ垂直(瞬間)立ち上げの荒波は続いているが、ユーザーの要求にマッチしたものをタイムリーに提供しながら乗り切っていこうと考えている。

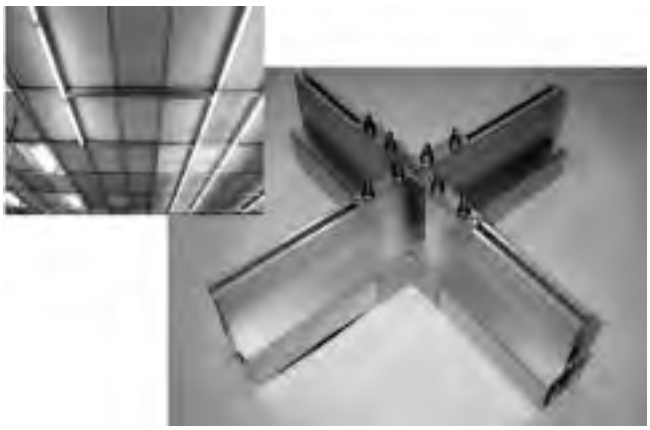


図3 クリーンルーム用天井フレーム

6. 宴会場で作る半導体

クリーンルームに数年前から“ミニエン”とか“ボールルーム”という単語が飛び出してきた。ボールルームとは、辞書をめくると“舞踏会場、宴会場”の意味である。ベイ方式のような細かく間仕切ったクリーンルームに対比させた用語として大部屋方式を表したわけだが、なかなかしゃれている。このボールルームは、FOUPなどを用い、その周囲環境のコンタミをあまり意識しない状況で成立し、いわゆるプロセスエリアとサービスエリアを区別しない。

超微細加工＝超清浄空間
↓
今までのクリーンルーム環境(人間と同居)に限界
↓
FOUPによるプロセスのミニエン化
↓
逆にクリーンルーム環境の緩和
↓
大部屋方式の採用　⇒　ボールルーム(BALL ROOM)

といった構図であろうか。“ボールルームになってクリーンルーム側は楽になったでしょう”と言われることがあるが、逆にさまざまな問題が新たに出てきている。

前述のような大風量の空気の循環がなくなった分、室内の温度分布の不均一性や小間仕切がないため緊急時の防災が検討される。さらにメンテ時の周囲への影響やFOUPからの移載時の外乱防止と局所クリーン化(狭義のミニエン)など我々にとってかえってやっかいなことも数多くある。将来、医療研究などで使用している完全密閉ラインでも構築できれば、作業者がGパンやジャージで仕事できるクリーンルーム(?)が現れるかもしれない。

7. おわりに

ロードマップで見てみると、10年後くらいには線幅は20～30nmである。製造に影響する塵埃パーティクルサイズは想像を絶するが、それよりケミカル汚染が問題になっている現在である。“何ミクロンのゴミが”というより、配線間に“何個の分子が並んでいるか”というレベルであり、空気中の窒素や酸素も外乱原因になりそうである。

三機工業は、これからも最先端技術をサポートし、その発展に寄与するために“クリーン環境の創造”を続けていく。

開発秘話：マスクブランクス

HOYA株式会社 先端リソグラフィー開発センター センター長　流川 治

1. はじめに

私は、1970年にHOYAの技術研究所に入社しガラスメモリーの開発に従事していた。ちょうどその頃、半導体メーカーではフォトマスク用の高品質ガラス基板を探していた。当社にはカメラ用カラーフィルターを作るための高精度研磨技術があり、この技術を応用しての製品開発に着手していた。1974年の始めから現在の山梨県北杜市長坂町に保谷電子という子会社を設立し、この研磨品の供給を開始した。これと期を同じくして薄膜コート品（ブランクス）の開発がスタートし、当初からこの仕事に携った。技術導入から始まり、独自の装置開発を成功させて、現在では7割を超す全世界シェアーを取ることができた。その主に開発に従事した30年を振り返る。

2. 基板材料

当社は光学ガラスの製造会社でもあり、高度な均質性と内部欠陥の少ないガラス溶解を得意としている。このような環境下でフォトマスクブランクス用サブストレートの供給が始まった。当初はソーダライム系のガラスであったが、1:1の投影露光法が開発され、低膨張ガラスが必要となり、従来の1/3程度の線膨張係数を持つLE-30というガラスを開発した。高融点の硼硅酸系ガラスであったため、泡歩留りが安定せず苦労は多かったが、非常にタイムリーな上市であったため80%以上のシェアーを取り、HOYAの名声を高めることができた。

3. スパッター技術

ガラスの相変化による抵抗率の大幅な変化を利用してメモリー材料ができるのではないかという想定のもとに、Ⅱ-Ⅵ族からなるカルコゲナイドガラスの組成開発を行っていた。その素子化を目指しての薄膜化としてスパッター法の開発を試みた。当時は、ベルジャータイプの4極高周波スパッター装置が、私にとって初めてのスパッター技術との出会いである。前述のごとく、保谷電子竣工とともに長坂工場に出向し、スパッター技術のすべてをまかせられた。すぐにTAU Lab.というIBMからスピンアウトした技術者集団の会社からの技術導入となり、その時に導入した装置が図1である。

当時はガラス屋にとってクリーン化技術は無縁のものであり、すべてが新しいことばかりであった。このスパッター装置は、高周波で基板にもバイアスのかけられるスパッターダウンの装置であり、論理的には非常に良く考えられた装置であった。

自動圧力制御システム等の最先端の制御装置が付いていたが、システムの安定再現性が悪く、結果的には使えなくて単純なマスフローメーターに置き換えざるを得なかった。この装置のターゲットは500mm ϕ 強あり、5インチ角程度の大きさの焼結クロム板の貼り合わせでできていた。この1枚1枚の品質バラツキも大きく、悪い物の直下では、全く良品が取れないということもしばしば経験した。あまりにも低ピンホール歩留りとそのバラツキによる納期遅延に困りはて、とうとう自分でターゲットを調達することにした。メッキのターゲットである。通常数ミクロンのクロムメッキのところを500～1,000ミクロンの厚膜メッキをお願いし、これをハンダ付けで巨大なウラ板に貼り付けてもらった。諏訪の町工場の数々の人々に助けられての結果であった。いずれにしても商社なしでの技術導入であり、英語力の乏しい自分としては、思った通りのコミュニケーションが取れず困難続きの毎日であったが、必要なものは自分で作るしかないという信念のもとになんとか乗り越えることができた。それでも金輪際輸入品は使うまいと思い、次の国産装置の開発を始めた。1977年にバッチ式インライン装置の導入を試みた。それがプレーナーマグネトロンと言うカーソードを使った最新の高速スパッター装置である。当時クロムブランクスを作る装置はある特定の1社に決まっており、それを購入すべきというのが大多数の意見であったが、担当の役員がセミコンでの展示品の購入を即断してくれた。その発展形が図2である。この装置は、全長8メートル程あるバッチ式のインライン装置である。実はこの装置に至るまでにはかなりの回り道をしている。低反射ブランクス

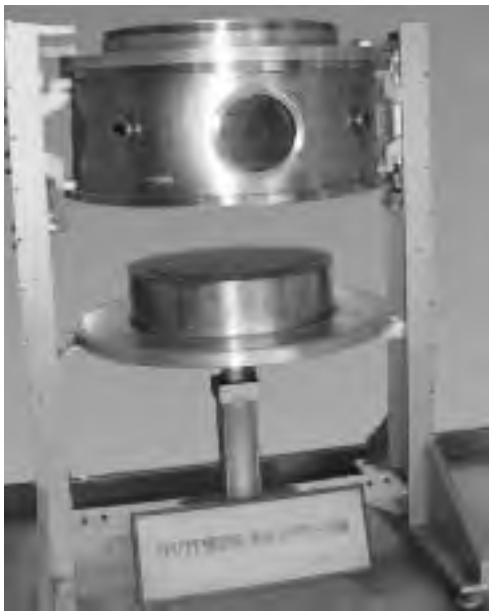


図1　スパッター1号機（TAU）

の必要性が明らかになり、低反射用酸化膜を単純に酸素中でクロムを蒸着して作ったものでは良いエッチング特性が得られなかった。あるデバイスメーカーでは自分でブランクスも作っており、スパッター法でこの低反射膜を成膜していた。この膜がどうしてもできなくて、とうとう開発を中止させられ、繋ぎに蒸着機を何台も購入せざるを得なかった。しかし自分としてはスパッター法による低反射膜の試作を諦めなかった。試行錯誤の結果完成したものがAR3（3番目の低反射膜）である。エッチングタイム、アンダーカット等、すべての特性のバラツキが半分となり、これを基本系とする膜が後に全世界のデファクトを取ることになる。その後位相シフトマスクが必要となり、膜厚分布の問題からインラインタイプでは限界となり、最先端ブランクスは枚葉式の装置へと移行している。



図2　インラインスパッター装置

4. HOYAセミナー

1983年9月、プレスセンターホールで第1回日米フォトマスク技術シンポジウムを開催した。これは当社が主催し、全世界のフォトマスクに関係する第一線の研究開発者の講演を、マスク関係者が一堂に会して聴講するというものである。当時は競合他社の開発者が一堂に会すということは画期的なことであり、多くの人に喜ばれ感謝された。常に2年以上先の話をしてもらい、2年間隔で4回続いた。さすがに5回目は半導体ショックで費用の捻出ができず断念した。その後復活も考えたが、PMJや長瀬セミナーがすでに定着しており4回で終了とした。非常にもったいないことをしたと今では深く反省している。第1回目は技術講演の後、「フォトマスクの未来」というテーマでパネル討論があり、デバイス側、露光機側からのマスクのあるべき姿が論じられた。私はHOYAとして開発課題（石英マスクブランクスの問題点）のプレゼンを行った。第2回はEBリソグラフィー、第3回、4回はサブミクロン用高精度マスクについて論じられ、第4回（1990年）では日本側から3件の位相シフトマスクの発表を企画した。客先からの新ブランクス開発の要請には、必ず答えることを以前からモットーとしており、この位相シフト技術も最初の開発段階から深く関与した。タイムリーな講演テーマ選定と、それにふさわしい第一線の技術者の招聘ということで、常に世界レベルでの技術開発動向を把握する必要があった。また常にHOYAとしての新しい提案発表が義務づけられており、大変ではあったが非常に勉強になった。

5. スタンダード活動

まぼろしの9インチレチクル規格（9035）とか、教育プログラム（STEP）だとか、ブランクスのトップベンダーとしての責任上、標準化活動には積極的に参加した。今でも良かったと思うのは、1990年のタスクフォースで6インチレチクルの標準板厚を6.35mmにしたことである。従来5インチは1.5/2.3mm、6インチでは2.3mmが一般的であったが、6インチレチクルの標準板厚を6.35mmとし、一挙に3倍弱にしたわけである。国内でもマスク価格の上昇の問題等から多くの異議がとなえられた。自重たわみと位置精度の関係等からも、複数世代対応を考慮した上での提案であった。最終的には、なんとか理解、納得をしてもらったが、おかげで今でも板厚変更の要請はない。また異物対策のための端面研磨についても、洗浄機の改造が必要となる会社が出てきたりして、なかなかすんなり行かなかったが、データベースでの根気強い説明を行い、最終的にはなんとか同意を取り付けた。今にしてみてもこの対策なくして今の品質はないと思っている。

6. 終わりに

以上、半導体露光用フォトマスクがエマルジョンからハードマスクに変り始めた初期の頃からこの材料開発に取り組むことができた。研磨技術はほぼできあがっていたが、スパッター技術に関しては何もない中でのスタートであり、「ただただ他社の人ができているのに何故自分にできないのだろう、悔しい、絶対なんとかしてみせる」との思いがすべてを成功に導いてくれた原動力であったように思う。それに忘れてならないのは、トップの方々が、それぞれの立場で任せてくれたことである。オイルショック直後にようやく2台目の購入を決断しTAUの装置の引取りに一人で行った時も、あまりの歩留りの低さに受取って来ていいものかどうかを国際電話で確認した所、「やるのはおまえだからおまえが決めろ」と、それだけであった。もう一つは、デバイスメーカーのマスク開発担当者の皆様の協力である。積極的に新製品の特性を評価し、自分の上司を説得してその採用に導いてくれた。ある種の信頼関係が成り立ち、お互いに「あの人が言うのだからしかたない。言うことを聞こう」と言ってやったことが、数々の性能アップ、歩留りアップに繋がって行き、ひいては世界一の品質と信用を勝ち取ることができた。技術屋一人一人が自分の責任と自らの問題意識で行動し、上司がこれを容認してくれることが、難しい開発競争に勝ち抜いて行くすべての根源であるように思う。最後にこのような環境を与えてくれたすべての人に感謝して私の話を終わりとしたい。

開発秘話：プローブカード

日本電子材料株式会社 取締役 開発統括部長　古崎 新一郎

1990年代前半、プローブ技術の危機が迫っていたとき、新しい構造の垂直型プローブカードを開発した。そのエピソードである。

1. 序

プローブカードとは、プローブが固定的に取り付けられているカードという意味である。この製品は、半導体ウェハ上に形成された集積回路をウェハ段階で機能試験するために、その電極（ボンディング・パッド）に接触して、自動試験装置（テスタ）からの電気エネルギーの供給と電気信号のやり取りを媒介する部品であり、プローバと呼ばれる自動ウェハ搬送装置に取り付けられて使用され、三者一体でひとつの試験システムを構成する。プローブカードは少ない材料構成と単純な構造からなっている。だが面倒な問題が付随する。まず接触相手が微細かつ高密度であるために高精度が要求される。高温・低温の試験環境でも精度を保つ必要があるために高強度も要求される。さらに高速試験を可能にする必要があるため高品質の電気特性が要求される。これらの問題は、限られた空間で機械と電気の両方の要求を満足させるという技術的興味を掻き立てる課題であり、ここにプローブカードの商品価値がある。その世界市場規模は現在600億円程度で、さして大きくはないが、今後はさらに要求が高度化し、市場規模も大きくなると予測されている[1)]。

プローブカードの最初の形態は、先端の尖った細いタングステン棒を片持ち梁状に固定してスプリング機構を構成し、尖った先端で集積回路の電極に押圧接触するというものである。このプローブカードの技術がわが国で確立されたのが1971年2月である。これは当社によってなされた。カンチレバー型と呼ばれ、今も健在である。しかし、1990年代初頭には、半導体デバイスの同時測定個数が増大していき、同時に、電極のピッチがますます小さくなることに対してプロービング技術がついていけないのではないかという危機感が覆っていた。我々は新しいプローブカード開発のプロジェクトを起こした。1992年6月のことである。開発チームは本社および熊本工場の技術・製造のスタッフで構成し、開発の実務は熊本工場で遂行することとした。この危機をビジネス・チャンスにする、というスマートな感覚は当時我々にはなかった。必死なだけであった。

2. 垂直型プローブカードの開発

二つの課題を遂行した。カンチレバー型プローブカードを超微細化へ対応できるよう技術の改革を行うことと、従来のプローブカードとは異なった構造のプローブカードを生み出すこと、である。

微細化するだけでなく、電極配置が多彩になり、同時測定個数がますます増加していくという要求に応えるためには、プローブを集積回路の電極の真上から垂直に当てるしかないと考えた。しかし、単純に金属ワイヤを垂直に立てただけでは、妥当な押圧力にするために垂直距離を異常に長くしなければならない。そうすると、広く使用されているプローバの高さ方向寸法に合わないという根本的な問題があった。

技術者は自ら考えて動いてみた。製造の妙手達の協力を得て、タングステンワイヤを「コ」の字型に曲げて試験的に組み立てて感触を見たのである。印象的であった。この方式でおもしろい製品ができる。そう感じた。我々は二つの外部仕様要求を設定した。従来と同等の押圧力で良好な電気接触が得られることと、寸法が従来と同等であり完全な使用上の互換性をもつこと、である。構造の方針を定めた。穴のあいた2枚のセラミック・ガイド板の間にタングステンワイヤを通して挟む構造である（図1参照）。ワイヤが発生する押圧力を少なくするために、それを半円形状に曲げた形にした。これにより、外形寸法を従来と同等にして、押圧力を調節できるようになった。その過程では、ワイヤをS字形に曲げること等多様な試みをした。一見よさそうなS字形は、その機械特性により、使用時に2枚のガイド板の間で望ましくない方向にワイヤが弾性可動するということがわかった。単純な形が最もよい。そう結論した。製品化するために細いワイヤの加工技術開発が必要となり、実行した。直径80ミクロンから本格試作に入った。

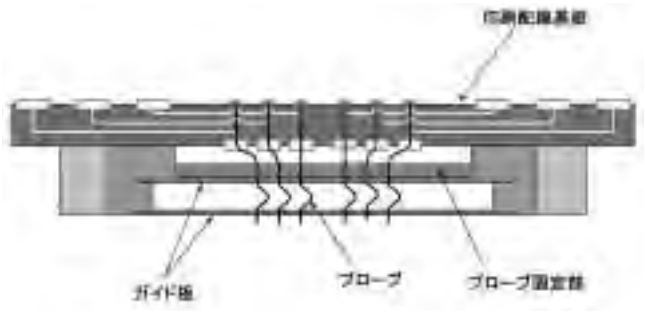


図1 垂直型プローブカードの概念構造

試作と実験の繰返しの後、プローブカードとしての基本的な特性が達成されたことを確認できて先がみえてきたと思った。1993年のことである。ここから、やっかいな問題をかかえることになった。安定した電気接触の確保という問題である。先端が平坦な垂直方式プローブで良好な接触をとるためには、押圧力を大

きくするか、装置での特別な操作が必要になるだろう。これらは最初から拒否したことであった。本質的対策としてプローブ先端形状を改善することにした。プローブ先端形状はプローブカード全般に共通する問題である。プローブの押圧力を大きくしないで、安定した電気接触をとるためには、単位面積あたりの荷重を増加させるしかない。そのためには、プローブ先端をできるだけ鋭利にすることである。鋭利にするといっても、直径が25ミクロン程度の微細なプローブ先端を妥当なコストで安定して加工することは容易ではなかった。幸い、この問題は平行して進めていたカンチレバーの技術改革の課題とも軌を一にしていた。結局、プローブ先端を丸く加工することで、目的を達することができた。これ以降、プローブ先端を丸く加工できる技術は当社の特徴となっていった。

3. 展開

開発に着手して1年程で原型ができ、評価サンプルを顧客に提供し、実用上の感触をみてもらうところまで進んだ。しかし、本格的な量産工程で使用されるにはそれから数ヵ月の時間を要した。従来とは異なった構造であるため、プローブの耐久性について神経質になっていたのである。種々の試験をやった。だが、社内試験は完成度を上げるのに貢献したものの、不安はまだ内在していた。

営業部門が大きな一歩を踏み出すきっかけを作った。スクラブマークが極めて小さい、多数個同時測定を構成しやすい、という垂直型プローブの特徴を利点として、DRAMメーカに紹介し、採用されるに至ったのである。お客様に採用されたら、我々は、それまでの自己疑心を捨てて、設計・生産の内容充実に努めた。量産工程で使用されるにあたって、我々は依然としてプローブそのものの耐久性を最も心配した。初めてこの製品が使用されるときに、その製品の特徴がほとんど知られていなかったために、導入の最初でプローブが損傷を受けるという現象が出た。が、一度使用され始めるとプローブの損傷はほとんど皆無であった。垂直型プローブは強靭であるということが理解された。その過程では丸いプローブ先端の光学的認識システムをプローバに導入する必要が生じた。プローバメーカの方々には随分ご苦労をおかけしたことと思う。

ところが、思わぬところに予期せぬ大問題が発生し危機に直面した。使用中にセラミックガイド板が割れるのである。割れるといっても「ひび」が入るのであるが、これがプローブ位置精度に不安要素をもたらし、テスト結果に疑念が生じた。1995年のことである。何十台ものプローバにセットして長時間使用されている中で、一定期間経過後、継続して発生するのであった。取り外して保守作業するときにセラミック板に「ひび」が発見された。またその作業中に発生したりした。このままでは需要の大きいDRAMの生産に障害を引き起こす。お客様に迷惑をかけることはできない。ウェハテスト工程に当社のエンジニアが交替で常駐し、不具合の確認、手入れ、新品との無償交換を行った。このラインを止めてはならない。力を尽くした。私達はお客様の不屈の気持に助けられた。

現地での対策と並行して、社内では現物を徹底的に分析して、解決を図った。原因は、ガイド板に使用していたセラミックの強度不足であったのである。高強度のセラミックの導入と構造改善で、問題は潮が引くように解消していった。当時、熊本工場の開発と製造の両部門の責任者であった私は極めて追い詰められた精神状態になっていたことを覚えている。この問題の解決には社内の各部門から知恵と助けが来た。皆自分の問題と考えていた。有り難かった。顧客への推奨からその安定使用まで営業のリーダが果敢に動いた。製品開発と事業化の成功のためにはマーケティングの熱意も不可欠だったのである。

この製品が本格的に量産工程で使用されたのはDRAMの16個同測テストにおいてであるが、それまでの製品とは違い、同時測定個数が増えると、ガイド板の面積も広くなり、それだけ大きなストレスを受け、材料のもつ特性上の限界が露見することになったわけである。これを教訓に、セラミックを使用するプローブカードの設計においては、強度と耐久性について執拗な検討をするようになった。

4. 発展

この垂直型プローブカードの応用について1996年のITCで発表した[2)]。製品は今も進化し続けている。プローブも細くなり、対応できるピッチも細かくなった。タングステンに代わって、電気接触がはるかに安定した貴金属合金材を開拓し、それを強化してプローブ材料として適用した。プローブの押圧力も開発当初の半分以下になった。16個同測から出発した構成は、DRAMの32個同測、64個同測へと適用が広がった。どの構成の実現も世界で最初だったろう。現在では200mmウェハ上のフラッシュメモリを一括して測定する構成にまでなった。ロジック製品の同測テストにも適用されている。12年前の垂直型プローブカード開発は、当社のアドバンスドプローブカード開発の原点をなすものであった。現在まで幾種類もの製品が世に出て、それぞれ活躍しているが、最初の垂直型プローブカードが今もその特徴を活かして進化していっていることを心強く感じている。

〈参考文献〉

1）VLSI Research Inc. "The Probe Card Market Update" April 2005
2）Sasho, S. & Sakata, T. "Four Multi Probing Test for 16 bit DAC with Vertical Contact Probe Card" International Test Conference 1996 Proceedings

開発秘話：DRM酸化膜エッチング装置の開発

東京エレクトロンAT株式会社 常務執行役員　田原 好文

1. はじめに

1990年代初頭、東京エレクトロンは酸化膜平行平板プラズマエッチング装置（TE580、TE5000）で国内シェアNo.1の座にいた。しかし、方式が既知技術のため、海外、特に欧米の顧客には受け入れられていなかった。一方それを打破するため、営業部主導の開発プロジェクトはA社から技術供与を受け、レジスト異方性エッチング対応マグネトロンエッチング装置（以下MRIE）を開発していた。

2. マグネトロンRIE装置開発と失敗

レジスト異方性以外のプロセスにもMRIE装置を応用することになり、プロセス部隊の投入が決定された。当時プロセス部隊のリーダーである筆者に、プロセス開発が任されることになった。私は最初に、MRIEの濃淡のあるプラズマが磁石回転と同期して動くのを見て、これは物にならないと直感した。なぜなら、プラズマモード開発の過程ではいかに均一で安定的なプラズマを作るかに開発の主眼を置いていたからで、その目で見るとMRIEは容認できないプラズマソースであった。プラズマを見た即日、当時の上司に自分は「MRIEはやりたくない、平行平板プラズマモードの方に将来性がある」と直訴したが、上司からは烈火のごとく怒られ、同時にMRIEの将来性とビジネスチャレンジの重要性を徹底的に叩き込まれた。それは、

・プラズマモードより一桁低い圧力領域で新しいプロセス開発できる可能性があること
・プラズマモードに限界が来た場合、ビジネスの将来がない
・エッチング業界で2世代制覇したメーカーはない。理由は既存技術に依存しすぎたためである。解決には既存技術を否定するような技術導入が必要なこと

当時すべてを理解、納得できたわけではなかった。というより、上司の剣幕におされ、私以下総勢10名程度のプロセス部隊はマグネトロンRIEのプロセス開発に投入された。プロセス開発は酸化膜、Poly、Alエッチングと大きく3分野のアプリケーションに分かれたが、ここでは酸化膜に集中して書いていきたいと思う。

プロセス開発を開始したものの、MRIEだから特別よい特性が出るものではなかった。圧力をプラズマモードより一桁下げたからといって、微細なコンタクトホールが抜けるデータはひとつも出てこない。そればかりか、プラズマ密度が高いためにレジストや下地選択比を落とすF（フッ素）が大量に生成され、選択比の点ではプラズマモードに及ばなかった。毎日のように技術供与元であるA社技術者と打ち合わせ、とにかくいろいろなガスを試そうという話になった。現在であればガスの特性や結合状態からガスを選び、（さらにいえば適切なガスを生成し）プロセス開発を行っているが、当時は勘と経験から手当たり次第にガスを選び、適当なプロセス条件で可能性を探っていた。

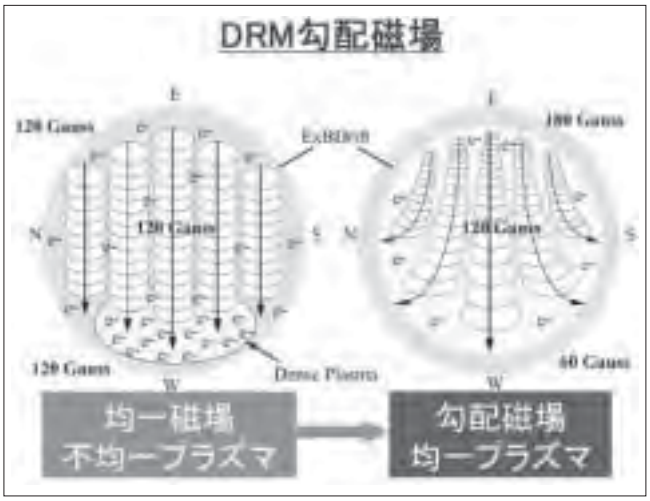
A社技術者との打ち合わせの中で添加ガス候補に何を入れるかが話題になり、主ガスCHF_3にO_2、N_2、CO_2、CO、Ar、He等が候補に挙がった。なかなか良い特性が出ないこともあり、我々は少々焼け気味になり、A社技術者より、「悔いがないように端から端まで条件を振りましょう」というコメントがあったことを覚えている。私はなんとも思わなかったが、若き部下がその言葉に反応した。当時の常識としては反応性の添加ガス、特にO_2、N_2等はエッチングガス（この場合CHF_3）の5%程度入れれば充分というものだったが、彼はCHF_3流量の5倍の添加ガスCOを入れて実験を行った。CHF_3＋COプロセスの完成である。選択比と微細加工性のトレードオフ関係を打破し、両立が可能な画期的なプロセスであった。このプロセスはエッチング業界に衝撃を与えたと今でも思っている。しかし、いくらプロセスがよくても、マグネトロンRIEには致命的な欠陥があった。それはプラズマの偏りから引き起こされるチャージングダメージであった。チャージングダメージはデバイスダメージに直結し、歩留まりを落とすと言われていた。結局多くの国内研究ラインには評価していただいたが、量産ラインに採用されたのは共同で開発したA社だけであった。マグネトロンRIEは商売として失敗したのである。失敗の烙印を押され、社内の開発プロジェクトは解散し、私のプロセス開発部隊だけは残り、ハード技術者は工場へ、または別プロジェクトへ吸収された。この時非常に悔しかったのを覚えている。「学術的（原理的）にはプラズマが偏り、否定されているが、商品として成功すればいいのだ！」という言葉を技術者は残し、プロジェクトは解散した。

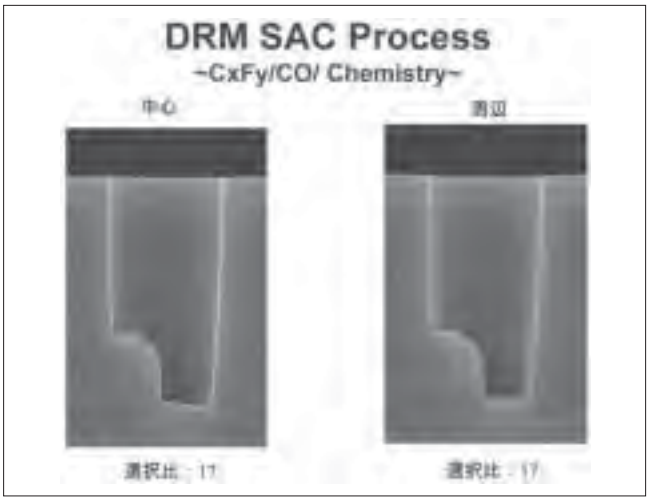
3. DRMエッチング装置の開発

ただA社はあきらめていなかった。ウェーハの200mm化に伴い、磁石が大きくなり、装置上面設置での回転は見た目も悪く、また磁場漏れが激しく、磁石回転時に隣の装置のCRT画面が揺れるほどであった。

そこでA社リーダーより新しい磁石の提案があった。医療検査装置用に開発されたDRM（Dipole Ring Magnet）である。今までの磁石は反応室の上で回転していたが、DRMの形状は筒状で装置の周辺に配置し、磁場分布はウェーハに対して完全均一平行磁場が実現でき、磁場漏れもほとんど周辺機器に影響しない、磁石として完成されたものだった。一部の技術者からは完全平行磁界になれば、チャージングダメージが軽減されるという期待の声があったが、我々は電子のE×Bドリフトのため、プラズマの偏りはさほど軽減できないと考えていた。上層部でもこの新しい磁石を使った装置開発には否定的であり、開発するしないで、のらりくらりと時間だけが過ぎていった。

一方、同時期に顧客側の開発状況が大きく変わった。次世代デバイス開発をアメリカ、欧州の2メーカーとA社で共同開発するこ





とが決定したのである。A社に引っ張られるように、当社も装置の売り込みのためプラズマエッチング装置だけでなく、熱処理成膜装置、レジスト塗布現像装置と、アメリカにある3社プロジェクトへプレゼンテーションに出向いた。ただプラズマエッチング装置だけは本社からの指示で、A社から要求があったDRMではなく、既存のMRIE装置を説明することになり、内容も非常にコンサバティブな資料を用意した。プレゼンテーション当日、3社の技術者が50人ほど集まった広い会議室でプラズマエッチング装置のプレゼンテーションを始めたが、顧客からの反応は当然冷ややかなものであった。その時、突然日本語で「おまえは装置を売る気があるのか！」と罵声が飛んだ。A社の技術プロジェクトリーダーである。声は私にではなく本社に向けられたものだった。会議は凍りついた。

その夜、私は工場の社長、エッチングの技術部長から薄暗いモーテルの一室に呼ばれた。技術部長が工場社長に「田原に任せましょう」と強烈に言ってくれた。沈黙の後、工場の社長からは「やれるか？」と聞かれた。若干迷ったが「はしごをはずされなければやります」と答えた。DRMエッチング装置開発の決定である。

DRMエッチング装置の開発を成功に導くためには2つの課題があった。ひとつはMRIE特有のプラズマ偏りからのチャージングダメージ低減。もうひとつは特徴のあるエッチングプロセスである。チャージングダメージに関しては、あらゆるプロセス条件領域で0にするのは無理だと思っていた。ただ前述したように、学術的にではなく、商業的に成功すればいいのである。それであれば使う領域に限定、この場合であればコンタクトエッチング周辺の条件で軽減できればよいと割り切っていた。MRIE開発プロジェクト解散後も、我々プロセス部隊は日夜磁石の配置、チャンバー内パーツの配置等試行錯誤を繰り返していたが、ある時部下が本来装置上部におくべき旧バージョン磁石を真横において試すと、わずかにダメージが低減することがわかった。わずかな変化であったが見逃さなかった。なぜだ？我々は磁界分布、磁場ベクトルを必死に見直し、実験を重ねた。関西の顧客の助言もあり、メカニズムがわかってきた。つまり、磁場強度に勾配をもたせ、ベクトルを曲げ、E×Bによる電子の動きを発散させるようにすればいいのである。このような磁界をつくるにはDRMは最適な磁石であった。自由に筒状の磁石のセグメントを変え、ウェーハに平行でありながら、磁場勾配をコントロールすることができた。プロセス条件限定ではあるが、チャージングがない装置のめどが立った。一方、プロセスである。当時微細化の要求からコンタクトホール構造に新しいSAC（セルフ・アライン・コンタクト）が提案されていたが、どのエッチング装置でも充分な選択比、再現性が取れていなかった。この構造はゲート上の絶縁膜（窒化膜）をストッパー膜に採用していたので、水素を含有しているプロセスガスを使うと、選択比がまったく取れなかった。しかしこの時もプロセス部隊は活躍した。おこなったことは前と同じである。ガスを次々試したのである。ただ幸運だったのは、新しいガスの提案が多くのガスメーカーから成されており、また当時のアメリカの競争相手はプラズマ物理には強かったが、泥臭いプロセス開発面は苦手であったことである。我々は、CxFy+COプロセスで安定的に窒化膜との選択比15を出せるプロセスとハードウェアをチャージアップダメージなしで開発できたのである。このCOプロセスもDRMに真にマッチしたプロセスだったことは後になってわかった。

4. 終わりに

この後、DRMエッチング装置は、一世を風靡したSACプロセスにおいて先述した3社プロジェクトに採用された。これを契機として世界中に展開し、酸化膜エッチング分野ではシェアNo.1を収めることができた。原理的には否定されていた方式であったが、プロセスの獲得とハードウェアの工夫で商業的に大成功を収めたのである。

顧客の支援と開発者の熱意、あきらめない心、常識への挑戦が成功を呼び込んだと思っている。

最後に、当社のエッチング装置ビジネスの基盤確立に魂を注入し続けた私の元上司である故堀内隆夫氏と、今も貴重な助言をいただいている東京大学の奥村勝弥教授、また現在も変わらずご支援をいただいている顧客技術者の方々に感謝をしながら筆をおきたいと思う。

開発秘話：集積化ガスシステム

株式会社フジキン 特任執行役員　山路 宮治雄

■はじめに

フジキン集積化ガスシステム（以下、IGSと呼ぶ）は1995年にスタートし、10年経った現在までに約15,000パネルの出荷実績を誇り、業界No.1のシェアーを獲得するまでになった。

この10年間にIGSは大きく変化し、装置の小型化、フットプリントの削減、トータルコストダウン等、半導体製造装置のガス系に多くの貢献をした。現在では製造装置だけに限らず、VMB（バルブマニフォールドボックス）や半導体関連以外の業界向けにも使用されつつある。幸いにも私はフジキンIGSの初期から現在に至るまで、開発の中心的役割を担ってきた。

■集積化ガスシステム(IGS)

1990年代半ばから、半導体製造装置のガス供給系をよりコンパクトに、かつメンテナンス性を向上させようという動きがあり、これを達成するため、ガス供給系を構成する機器類の基本構造、基本性能を維持しながら、接続方法に工夫が加えられた。その結果生まれたものが、今日、IGSと呼ばれているものである（写真1）。従来のガス供給系に使用された機器が、その長手方向に機器を接続する継手を持っていたのに対し、IGSでは、各種機器はベースブロックと呼ばれる、ブロック化された配管の上部に取り付けられる。機器はその下部にベースブロックと接続するためのインターフェースをもち、他の機器と干渉することなしに上部から着脱できるようになっている。このインターフェースに各社の特徴があり、フジキンではメタルガスケット方式の「Wシール」を採用していることが大きな特徴になっている。



写真1　集積化ガスシステム

■開発の経緯とコンセプト

ガス系の集積化を進める上で一番大切なことは何かと考えた時、機器を接続する継手部（インターフェース）の信頼性が一番重要だと考えた。半導体製造に用いる特殊材料ガスは、毒性を持ったものや空気に触れると発火するといった危険なガスが多種ある。そのため、ガス供給系の外部リークに対する要求は非常に厳しく、メタルガスケットが使用されている。初期の集積化用の継手として考えられたのは、従来のメタルガスケット継手のシール部をそのまま使う方法、もしくはメタルCリングをシールに使うというものであった。前者は締付トルクの問題、後者は量産化した時のシールの信頼性という点で不安な面があった。IGSに使用するシール個所数は約200箇所以上/1パネルとなり、シール部のリークの信頼性は非常に重要なものとなる。幸いなことに、フジキンではIGSが本格的に動き出す前に、従来のメタルガスケット継手に比べ、約30%小型でシールに対する信頼性を大幅に向上した小型メタルガスケット継手UPGを開発していた。この継手は従来の継手がシールと外力を先端R部のみで受けていたものを、「シール部と外力を受ける部分を分離する」という東北大学の大見教授のご指導で完成したものである。この継手シール部の設計をそのまま上部機器と下部ブロックの接続部に応用し、ボルトによる締め付け方式のIGS用メタルガスケット継手（Wシール）を開発した。このシールを使ったIGSを1995年のセミコン・ジャパンにて発表した。集積化することによりガス系は従来のガスパネルの約1/3となり、非常にコンパクトになったが、当時の集積化に関するコンセプトは小型化、シール性の信頼性のみが追及されており、今でいうIGSのコンセプトが達成されたものではなかった。当時はよく考えたつもりであったが、バルブは壊れることが少ないので交換を考慮せず、バルブ2個を上下に取り付けた構造とした。重量も非常に重く、かつメンテナンス性の良くないものであった。当時、弊社に来られた装置メーカの幹部の方より、フジキンのIGSは他社より2年は遅れているとのショッキングな言葉をいただいた。翌年に起死回生を期して再度、IGSに要求される要件は何かと社内で協議し、6つのコンセプトを提唱した。

①基本技術の高性能化　②小型化　③信頼性の向上
④施工性、メンテナンス性の向上　⑤標準化の推進　⑥トータルコストダウン

この6つの要件を満たすIGSを完成すべく、製造、技術、品管、営業一体となって、1996年に完成させた。完成までには社長、副社長をはじめ、毎晩遅くまでMTを実施し、他社に負けないものになるよう全員一丸で取り組んだ。

■要素開発(一部を示す)

1. レベリングシステム

信頼性の向上に関しては「だれが締めても止まるもの」「シールマージンの高いもの」ということで、いろいろ工夫をした。その一つをレベリングシステムと呼んでいる。IGSの部品構成は板金の上に下部ブロックを配置し、その上面にバルブ、MFC等の機器を配置する。ガスが流れる流路は下部ブロックと上部機器を交互に行き来し構成するが、板金の製作上のバラツキ（寸法、うねり等）および下部ブロックの製作上のバラツキ（高さ寸法等）が上部機器とのインターフェースに影響を与える。この板金および下部ベースブロックのバラ

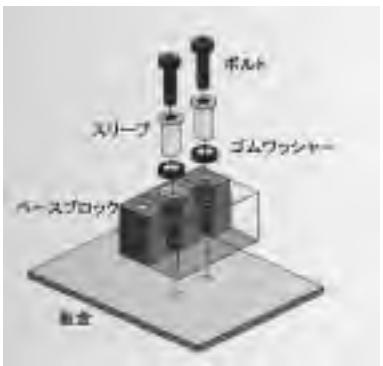


図1　レベリングシステム

ツキを吸収するシステムとして、レベリングシステムを考案した。レベリングシステムは下部ブロック内にゴムワッシャーを設け、このゴムの弾力分、下部ベースブロックが上下する構造となっている。上部機器接続時、下部ブロックが上部機器のシール面に自然に沿うことにより、Wシールの安定したシール性能を実現するようになった。このシステムによりWシールの信頼性はさらにアップし、漏れの全くない信頼性の高い構造となった。弊社は元々パーツメーカであるため、IGSも単品で出荷することを考えていた。インターフェースおよび構造そのものが他社との競合となったため、IGSは弊社で設計、組立、検査を実施したが、いつでもバルブ、ブロックを単品で出荷して組立・検査を他社に任せられるように考えていた。IGSは各社いろいろ出てきたが、単品で販売してトラブルなく運用できているのはWシールIGSだけではないかと思う。

2. ガイドリング

機器を下部ベースブロックに接続する際、シール部の位置合わせはシール性能の確保に重要なことである。IGSは社内で組立てる時は、板金を水平においてブロック、上部機器と配置するが、装置では垂直に取り付けられることが多い。当初はガイドリングのないガスケットとしていたので、MFCのような重い機器の場合保持が難しく芯ずれを起こし、シールマージンが小さくなることが判明した。急遽、今までのシール部の形状を変えず、垂直の施工に耐えるものを検討した。施工性を考慮し、ガスケットと一体となるものを開発した。緊急対応ということで設計、試作、評価を2週間程度でやった。ガイドリングはガスケットの保持金具の外周に取り付けられたステンレス鋼製のリングとし、機器とベースブロックのシール部の外側に設けられた溝にはまり込み、位置合わせの機能を果すものとした。ガスケットのシール面をガイドリングの中に入れたため、ガスケットのシール表面に配管工具、他の機器等が接触しないようになり、ガスケットに傷がつくことを防止できた。この問題をクリアーできなければ、今までの開発が水の泡になるとの思いで必死に取り組んだ。短期間で改良した割には、非常に多くの効果のあるものとなった。

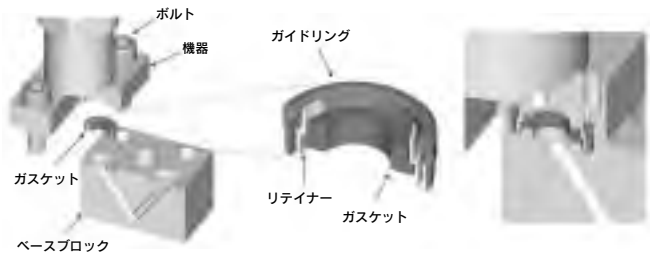


図2 ガイドリング付ガスケット

■Wシール実施権許諾

Wシールは特許を保有しているが、弊社だけでは全ての機器に対応することができないため、無償で実施権許諾を機器メーカに行った。採用していただくため、社内でプロジェクトチームを作り、世界中の機器メーカを訪問した。当初は行く先々で加工が難しいとの意見をお聞きしたが、シール性の信頼性、シール部のトータルコストでは他社のシールに負けないとの気持ちが強かったので、加工工具の提供、加工指導(加工プログラムの公開)、評価試験等を積極的に行って、多くの機器メーカに採用いただけるようになった。実績が積み上がるにつれ、機器メーカの方から逆に声をかけていただけるようになった。

■WTFセミナーの開催

WTF(W-seal Technology Forum JAPAN)セミナーを開催し、WシールIGSを多くのエンドユーザー、装置メーカ、機器メーカにご理解とご採用いただけるようにした。日本、米国で各1回ずつ実施した。日本国内では2001年6月22日東京/芝パークホテルにて開催し、97名の方にご参加いただいた。Wシールに関する設計思想、生産性、コストに及ぶ詳細な説明から、SEMIスタンダードへの取り組みについての説明を行った。

■スタンダード活動の推進

IGSのSEMIスタンダード活動は1997年に米国のTFとしてスタートしたが、フジキンは最初から積極的に参加し、日本の各メーカと協力しながらスタンダード化に尽力した。フジキンも含めて関係各社の思惑が交錯し、インターフェースを含めての一本化は実現できなかったが、最終的には1.5インチと1.125インチの各機器の寸法は統一でき、2004年にスタンダード化された。

■今度の展開

この10年間、IGSを進化させてきたが、今後の課題としては半導体製造工程の多様化に伴い、高温対応、オールメタル化、大流量化、高圧化の要求への対応が挙げられる。高温化については各種液体、固体材料ガスの用途拡大に伴い、200℃程度で使用したいという要求が多く出てきている。特殊な例としては350℃の要求もある。オールメタル化は、バルブのシート部に使用しているPCTFE等の樹脂の使用流体との化学的・物理的適合性の制限をなくし、用途の拡大を求めてのものである。高温で200℃を超えるものは、現状ではオールメタルバルブでないと対応は困難である。高圧化、大流量化については、ウエハーの大口径化、ガス供給方式の変更などから現状の標準的な仕様で満足できないケースが増えてきており、個々の用途に最適な集積化でのバルブの開発が必要となってきている。IGSに関しては日本製品が最も技術的に進んでいると考えられる。しかしこれは、常に大口のユーザーが近くにあり、ユーザーとの対話の中で生まれた要求仕様にきめ細かく対応してきた、ユーザー思考の賜物と考える。IGSの作業性を考慮した特長も、まさに開発段階でのユーザーへのインタビューで出てきた要求事項を具体化したものである。

■おわりに

2004年日刊工業新聞社主催の「第一回モノづくり部品大賞」の部品賞をUPG継手が、また2005年日本政府主催の「第一回ものづくり日本大賞」の優秀賞を「ゆらぎのないガス供給を可能にした半導体製造装置用超高純度集積化ガスシステム」で受賞した。これもひとえに多くの皆様のお蔭様と感謝しております。これからも保安、安全、安心を心がけ、ながれとともにながれをこえて、信頼され確実な本モノづくりを追求してまいります。

開発秘話：MEMS用シリコン深掘りエッチング装置の開発

住友精密工業株式会社 代表取締役社長　神永 晉

MEMS - Micro Electro Mechanical Systems (微小電気機械システム)ーとつきあうようになってから、かれこれ20年になる。それ以前の1970年代初めから、半導体製造プロセスを用いてシリコンで機械的部品の製作を手掛けていた方々は日本の内外におられるが、"MEMS"という言葉が米国を起点として一般的に使われるようになったのは1987年ごろと言われる。その当時の米国の動きに触発され、センサー等のMEMSデバイスの開発を思い抱きながら、1990年前後にMEMS用の微細加工プロセス技術の開発を試みた。

当初、小口径 (2～4インチ) 用のウェーハ工程一貫プロセス装置 (リソグラフィから成膜・エッチングを含む) を開発し、大学や企業の研究所向けへの販売を試みると同時に試作請負を試みたが、大きな事業とはならなかった。最近のMEMS向けファウンドリサービスの動きを見るにつけ、時期尚早であったかとの思いを禁じ得ない。そのような試みの過程で、英国で研究開発用に特化したプラズマプロセス装置を製造販売していた中小企業であるSurface Technology Systems (STS) 社の製品の日本向け販売を手がけた。

ほぼ同時期に、シリコン深掘り技術 (DRIE:Deep Reactive Ion Etch　図1) を開発・特許化したドイツのRobert Bosch社が、その基本プロセスを具体化する装置メーカーとしてSTS社をパートナーに選択し、DRIE技術の共同開発を進めることになった。MEMS用の微細加工プロセス技術の開発を推進していた当社は、すでに日本向け販売で良好な関係を確立していたこともあり、STS社を1995年に買収し100%子会社として傘下に納めた。買収成立後直ちに現地に乗り込み、英国人経営幹部とともに会社経営およびDRIE技術の開発とその装置製品化を進めた。1995年に世の中で最初のMEMS用シリコン深掘り装置が出荷されたが、期せずして欧州・米国・日本へほぼ同時期に納入された。



図1　Si深掘りエッチング例
高アスペクト比トレンチ形成
（1.5um幅×80um深さ）

従来の半導体製造プロセスにおけるRIEによるエッチング速度の数倍の速さで、バルクシリコンに高アスペクト比の溝を形成するこの技術は、ユーザーを驚かせ、その後のMEMSデバイス開発の大きな推進力となったと言われている。

このボッシュプロセスと呼ばれるDRIE技術は、シリコンのエッチングと保護膜のデポジッションを交互に繰り返すことにより高アスペクト比の溝を形成するもので、塩素系の腐食性ガスを使わず、クライオプロセスを必要とせずに室温でシリコン深掘りを可能とすることを特徴とし、MEMSの3次元構造を製作するための強力な微細加工技術となった。

1995年以降、このボッシュプロセスに基づきSTS社が世に出したICP (Inductively Coupled Plasma) によるシリコン深掘り技術は、デファクト・スタンダードとしてMEMS業界に受け入れられた。この高速エッチング技術により研究開発のみならず製品生産をも計画することが可能になったことから、ユニークな3次元構造を持つMEMSデバイスを設計する客先が次々に現れ、それを実現するための新たな要求に応える深掘り技術が求められた。我々はそのような要求を満足するために、基本的なボッシュプロセスに更なる機能を開発して追加し、ASE (Advanced Silicon Etch) 技術として集大成している。結局のところは、生産性を高めるためにエッチレートを大きくすることが至上命題となるが、並行して、側壁垂直度に代表される形状制御の維持向上、側壁の表面粗さの維持向上、レジストに対する選択比の維持向上、均一性の維持向上、さらにはSOI基板の酸化膜界面におけるサイドエッチ (ノッチング) 防止等々の新機能を付加してきた。これらの技術により、シリコン深掘りを可能とした基本的なDRIE技術から、複雑な3次元構造を持つMEMSデバイスを製品として生産することを可能とするASE技術に至るまで、ユーザーの新たな要求を満足するものとしてその機能を高めてきた。この技術を世に出して以来、新しいMEMSデバイスの開発を目指す多くの客先との間で、我々が提供する深掘り技術への客先からのフィードバックおよび更なる要求、それを開発課題として我々サイドにおける更なるプロセス技術の開発という繰り返しでレベルを高めてきた。

数々の国際会議でも、この10年間のMEMSの目覚しい発展は、このSTS社によるシリコン深掘り技術の貢献によるものと言っても過言ではないと言及されることが多いが、この間のエッチレートの進化を見ても図2にあるような大きな進歩を見せた。MEMSデバイスの場合は開口面積の大きなデバイスの加工を必要とする場合が多いが、ボッシュプロセスに立脚したASE技術は、半導体

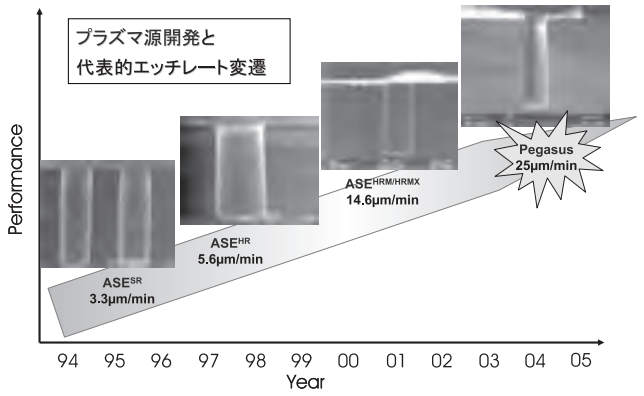


図2 Si深掘りエッチングレート向上の歴史



図3 ASE装置Pegasus

製造プロセスに使われてきた従来技術による深掘りに比して大きな力を発揮する。昨年発表した量産用ASE装置"PEGASUS"(図3) は、過去10年に亘るシリコン深掘り技術の集大成として、MEMSデバイスの量産ラインに供する最新鋭機である。MEMSデバイスにとどまらず、パッケージング用途など3次元加工を必要とする各種分野に順次導入が進んでいる。

STS社は、1995年に傘下に納めた当時は従業員70数名の研究開発型の小企業であった。英国ウェールズの炭鉱地帯の谷あいにあり、建屋も古く、固定資産の価値はほとんどゼロに等しいものであった。当時の日本における一般的な価値基準から言えば、買収を決断するのは非常に難しい状況ではあったが、潜在的な技術とそれを支える研究者・技術者集団に投資するという観点から敢えて買収に踏み切った。完全子会社とした後、業容が拡大する見込みがある程度立ったことから、新工場の建設プロジェクトに着手し、地元政府が研究開発型企業のために計画した工業団地に新建屋を建設し、1998年には、チャールズ皇太子 (Prince of Wales) のご来臨を得て竣工式を開催した。その後、2000年にロンドン証券取引所の新興企業向け市場AIM (Alternative Investment Market) に上場し、親会社として過半数の株式を保有しながらも公開会社とした。2001年のピーク時には、当初の10倍以上の売り上げを達成し、従業員400名近い規模の企業となり、地元からも大いに歓迎された。この間、STS社と当社の間で、技術者同士の交流、共同開発、等々を試み、言葉や文化の違いに戸惑いながらも相互交流を深め、2001年以降は日本国内のお客様のご要望に応え、迅速な対応を図るため、当社で国産した装置を日本市場で納入している。

過去10年を振り返ると、欧州・米国・日本・アジアのMEMSに関わる主要大学や企業研究所のほとんどに装置を納入し、業界デファクト・スタンダードとして、皆さんに使っていただきながら、新しく出されるご要求が我々にとっては次の開発課題となってきた。特に日本のお客様の試みが、欧米に比べて広範囲のアプリケーションを目指しているケースが多く見られ、STS社を含めた我々の開発課題設定において重要な役割を果たしてきた。
深掘り技術性能の飛躍的向上により、その用途が拡大し量産に供される分野が増加している。既に量産体制にある自動車用各種センサー、インクジェットプリンターノズル、ディスプレー等に加えて、現在DRIE技術を使用していないMEMSデバイスでも、その機能・性能向上の要求からDRIE技術を使用する動きが顕在化している。また、DRIE技術をその源にある半導体分野へ還流させ、パッケージングやパワーデバイスの分野でも、我々の最新技術が取り入れられている。
DRIE技術を初めて市場に提供し、その進展の先頭に立ってきた我々は、MEMS製品の開発が広まるに連れ増加している客先の多様なご要望に応えるため、MEMS加工技術の品揃えを拡大している。現在、シリコン深掘り装置以外にシリコンの犠牲層ドライエッチング装置、酸化膜の犠牲層ドライエッチング装置、レーザー加工装置および基板の薄板化用装置を提供している。
DRIE技術の特質を生かして、MEMSデバイスとして、シリコンジャイロの開発も英国大手企業との合弁会社で手がけており、すでに大量生産のレベルにある。MEMSの潜在的な用途は膨大である一方、それぞれのデバイスに固有の加工プロセスを必要とするという点はMEMSの魅力でもありまた大きな課題でもあるが、その観点から、微細加工プロセス装置事業に必要な技術開発とデバイス生産による量産検証の相乗効果も期待している。

MEMS産業発展のための業界のお手伝いにも関わっているが、MEMS産業発展のキーのひとつは、「MEMSデバイス」開発・製作者と「MEMS加工プロセス技術」開発・提供者、さらには「シーズ開発の役割を担う」大学との相互の共同作業にあり、それぞれの用途に応じた開発とそれに基づく事業化の実績を一つひとつ作り上げていくことが必要であると感じている。

開発秘話：半導体封止材料

住友ベークライト株式会社 顧問　筧 允男

1. はじめに

現在、私はわが国半導体材料メーカーの競争力を強化するために、経済産業省、NEDO（独立行政法人エネルギー・産業開発機構）の支援を得て、次世代半導体材料技術研究組合（CASMAT）の設立から運営を協力している。この組合は半導体材料メーカー10社により、バックエンドプロセスの最先端配線材料を研究しているが、今からの話は、30年ほど前、半導体樹脂封止材料の開発から業界での地位をようやく確立するまでの約10年間（1970～1980頃）を振り返る。

エポキシ樹脂半導体封止材料はSEMIの発表によると、2005年1,569.3百万US$（約1,800億円）/年とビッグ市場であり、当社も市場シェアー30%を超え、トップシェアーになっている。しかし、当時（1970年頃）、ICがようやくセラミック、ハーメチック封止から樹脂封止へと使われ始めた時期であり、当社もプラスチック加工業として、半導体業界とほとんど取引はなく、IC用のエポキシ樹脂半導体封止材料（以下「EME」という）の販売は0であった。

2. 開発のきっかけ

1970年頃、私はフエノール樹脂にガラス繊維を充填した成形材料（以下「ガラスPM」という）を、通信機器、コネクター、自動車機構部品市場へ開拓していた。当時、韓国にてモトローラは米国製のガラスPMにてIC、トランジスタの樹脂封止をしていた。しかし、品質のレベルアップとコストダウンの目的でモトローラより当社への引合いがあり、先方の評価にて採用が決定し、韓国モトローラで当社のガラスPMが使用された。当初は気づかなかったが、当社のガラスPMには強度向上にシラン系カップリング剤を採用していたが、これが他社との品質差につながった。ただし、当社には半導体の知識はほとんどなく、当然モトローラも承知しており、出荷ロットはすべて先行サンプル（立会い）をアメリカ本社にてテストし、合格品のみ韓国へ出荷した。3年ほど継続したが、その後エポキシ系材料へ変更、ビジネスは終了した。しかし、IC、トランジスタの組立のため、100台を超えるマウンター、ボンダー、数十台の低圧成形機が配置された大きな組立工場を見た（現場にて立会い成形のため）印象は強烈であり、当社の関係者にも本ビジネスの将来性を認識させた。

ちょうどその時期（1973年）、大手通信機メーカーA社から、IC封止用樹脂の共同開発の依頼が舞込み、当社にとって願ってもない話であり、早速開発チーム（専任研究者4名）を結成した。当時、ほとんどの半導体メーカーのIC封止材にはモートンケミカル（米国）のP（ポリセット）-410が使用されており、A社も当然使用していたが、今後の海外メーカーとの競争には、どうしても品質、価格ですぐれた国産品をA社は要望していた。

3. EMEの開発－I 技術確立

A社との共同開発を始めて約3年間、P-410に対抗できる製品ができなかった。さらに開発費の垂れ流しと社内の立場は最悪、いつA社から見切りをつけられるかの状況であったが、弊社トップと関連部門の理解及びA社の支援で、1976年に開発品がようやくA社に採用となった。

技術的に記すのも恥ずかしいが、主な点を列挙すると、

①材料組成面では、エポキシ硬化システムを当時では常識のアミンまたは酸無水物からフエノー系への変更により、耐水性、耐熱性、保存性が格段向上した。

②不純物管理も初めての経験で、ナトリウム、塩素の測定法とその管理を原料メーカーと共同開発で分析法を確立した。

③充填材：シリカ粉末の粒度分布の測定、管理も原料メーカーの協力を得た。

④信頼性の一つである耐湿性：プレッシャークッカーテスト（PCT）が最大の難関であった。測定環境試験機がなく、医療用の滅菌器を改造して使用した。品質はガラスPM時代の知見を生かし、シラン系カップリング剤により解決した。

しかし、A社採用になった当社の封止材は、とてもP-410を超える製品ではなかったが、その後、当社の開発レベルを大幅にアップさせた出来事が2件あった。

一つが、当時の日本電子工業振興協会（現JEITA）の研究委託費受託である（1977年）。EMEの耐湿性と耐熱性向上の課題で受託し（約8,000万円、2年間）、受託費をすべて評価、試験装置購入にあて、評価技術のレベルアップと研究開発促進に寄与した。また、本受託は当社内でのEME開発の重要性を認識させ、以後研究者の増員につながった。

もう一つがA社からの信頼性評価技術の指導である。ライバルのモートンケミカルが、海外半導体メーカーの協力で、信頼性装置一式（組立工程）を導入していることをA社が知り、当社の開発スピードとレベルアップのため、組立装置（マウンター、ボンダー）と評価用TEG（アルミ配線のみ）をA社の協力で導入した。組立、評価用のクリーンルーム（クリーン度は1万レベルの小部屋）を設置した。当社にて半導体チップの組立とTEGによる高温処理のリーク電流および高温高湿処理後の耐湿性（特にアルミ配線腐食）評価が可能になった。この評価で、不純物および密着性（特に樹脂とリードフレーム）の重要性がわかり、当社EMEの品質向上に大いに寄与した。当社にとって、クリーンルームの設置および半導体組立評価は初めての経験であり、本開発を進める上でも画期的な出来事であった。また、本件を指導、協力したA社も当社の実力アップに満足していただいた。

4. 生産管理について

本開発は、検査から品質保証への当社の意識転換にもなった。国内外のデバイスメーカーがEME採用のため、QC監査（含むラインチェック）を実施した。単なるEMEの品質検査、管理ばかり

でなく、工程管理まで顧客がチェックし、生産管理および製造設備管理まで指摘と要望を受けたのは、当社にとって初めての経験であった。当初はそこまでしなくてもとの戸惑いもあったが、生産管理をする上での重要性を認識し、従来の検査の意識から品質保証の考えへのきっかけとなった。

当時(1977～1979年)、生産管理面で印象に残る出来事が2件あった。一つはEMEの充填材に無機粉末(シリカ)を使用していたが、特に高充填のEMEにて、このシリカが生産設備(鉄製)を磨耗させ、その磨耗粉末(鉄分)がEMEに大量に混入の指摘を顧客から受け、当社で分析し100ppm以上存在していることがわかり、びっくり仰天した。工程には、マグネットによる鉄分除去装置を設置していたが、ほとんど機能していなかった。急遽、ラインで磨耗が発生しやすい箇所を超鋼および強化セラミック製に改造し、磨耗対策ラインとなった。

もう一つはある新製品の開発にて、A社での信頼性合格後、ライン投入当初は問題なかったが、その後すぐに選別にて不良発生し、A社での不良解析からチップ(素子)が破損(割れる)しており、EMEがダメージを与えていると指摘を受けた。必死の原因追求にて、信頼性向上に効果のあるシラン系添加剤の一部未反応成分がそのままEMEの中に残り、封止成形後にチップと未反応成分が結合しチップを破損させていていることがわかった。シラン系添加剤は水分により反応が制御されるが、問題発生時期は年末の乾燥時期にあたり、未反応成分がEME中に残存していたことが原因であった。それまでの生産ラインは温度、湿度上限管理であったが、上限と下限管理へと変更した。絶縁材料の生産現場では水分が敵との常識で管理していたので、冬季(乾燥時期)に加湿管理は初めての経験であった。この管理により、EMEの品質の安定と向上に大きく寄与した。

5. EMEの開発-2 新製品の開発

1980年以降、開発、評価体制および生産、品質管理体制も整い、国内外のデバイスメーカーの信用も得て、販売数量が増えつつあった。また、ライバルは海外から国内の材料メーカーとって代わり、トップは日東電工で、それに次ぐ地位になった。この時期に市場をリードする二つの新製品を開発した。

一つはメモリー用ソフトエラー対応EMEの開発である。インテルよりDRAMがα線で誤動作発生を発表し、その原因であるα線の発生源がEME(充填材に使用するシリカフイラー中の微量のU(ウラン))との指摘をした。寝耳に水の話であったが、早速開発チームを結成し、まずUの分析法は学会誌情報から情報を得て、NTT(当時通研)と接触し技術導入をした。全原料分析からα線発生源は天然シリカと難燃剤(三酸化アンチモン)であることを他社に先駆けてつかみ、原料メーカーの協力でシリカおよび難燃剤はUを含まない合成タイプへ切り替えた。α線測定カウンターも海外から導入し、U分析とα線測定データを添付したソフトエラー対応EMEをいち早く上市し、メモリー用封止材市場のトップシェアーを確保した。当時、チップをポリイミドコートで保護する技術も使われていたが、より安全のためにソフトエラー対策EMEとイミドコートを併用するデバイスメーカーもあったため、ほとんどのメーカーへ採用された。

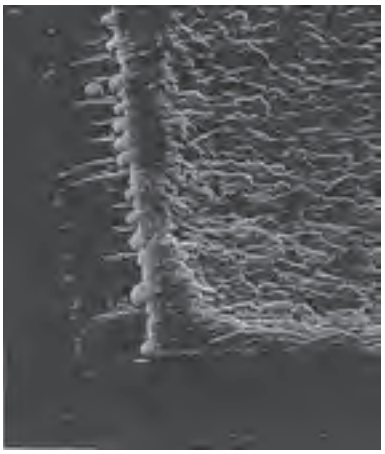


写真1 Al 配線変形の走査型電子顕微鏡による拡大写真

もう一つは低応力EMEの開発である。チップが大型化(LSI)し、パッケージも薄型(QFPの出現)となり、封止材とチップとの熱膨張係数の不整合による歪が増大してきたためである。このためアルミ配線変形 (写真1)、パシベーション・クラック、樹脂クラック(写真2)などの故障が発生し易くなる。また、温度サイクル試験にてこの種の不良がさらに顕著になってきた。

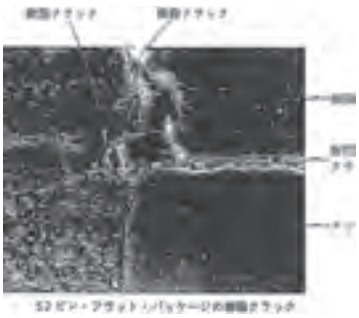


写真2 52ピン・フラット・パッケージの樹脂クラック

封止されたLSIの中において、温度変化によるチップ周辺の応力発生を有限要素法によるシミュレーションにて計算した。最初は適当なソフトも見つからず、当社の大型コンピューターによる計算に頼ったが、その後、橋梁計算に使用されていたソフトが見つかり、手持ちのパソコンで計算できるようになった。

この結果、EMEの熱膨張係数(α1)と弾性率(E)を小さくすることおよびガラス転移温度(Tg)を高くすることとして、開発目標値を推定できるようになった。相反する目標物性を達成するために、α1、Tgを下げずにEを小さくする目的で樹脂と充填材の間にバネ構造を持つ手法(海島構造)により新製品を開発した。有限要素法によるカラー印刷資料と特殊顕微鏡による海島構造写真による低応力EMEのPRは、顧客に大好評でシェアー獲得に貢献した。

6. 終わりに

本開発は会社生活で特に印象に残る出来事である。しかし、決してかっこうよく、理論に基づいた、先を読んだ開発ではなかった。半導体業界の想像を超えた早い動きに対し、問題・課題および顧客対応に全力で当たり、まさに七転び八起きであったように思う。今、振り返ってみると、開発当初にすばらしい顧客(A社)に恵まれたことと、開発苦戦中に当社経営陣の理解さらに優秀な研究者の投入があったことが大きかった。また、我々の開発チームの決してあきらめず何とかして問題解決する強い気持ちが、ライバルより少しは勝っていたとひそかに思っている。

開発秘話：大型ガラス基板用レジストコータ

大日本スクリーン製造株式会社 FPD機器カンパニー 製品技術部長　木瀬 一夫

1. はじめに

当社では、ガラス基板（液晶）用レジストコータを製造販売してきた。2004年にこれまでのスピンコータに替わる、スリットコータ（商品名：リニアコータ®）を商品化すると、一気にこの塗布方式が業界標準となって稼動し始めた。液晶ディスプレイの製造工程では、半導体製造装置の流れからスピンコータを利用してきたが、ガラス基板形状（矩形）やサイズの都合から、フォトレジストの使用量が多く且つ利用効率が低かった。生産コスト削減のためにも極力レジストを無駄にすることなく塗布したいという要望が強かった。

2. スリットノズルとの出合い･･･スリット&スピンコータ開発

私は入社当時、薄膜塗布用のロールコータを担当しており、TFT-LCD製造に利用されているスピンコータ性能を目標に、新型ロールコータの開発を担当することになった。80年代の終わりに定量方式を検討する目的で、要素実験機を試作した時に、精密押出しダイ（スリットノズル）部品と初めて出会った。当時、この部品との出会いが、その後の装置開発に重要な役割を果たすキーパーツであることなど知る由もなかった。ロールコータには、精密調整が必要とされるスリットノズルは採用されず、精密ローラーを定量に利用した「ランドコータ」が商品化された。その結果、スリットノズルを深く追求することなく、当時の貴重な経験と青焼き図面は、机の引出しに眠ることとなった。その後、私はスピンコータを組み込んだコータデベロッパを担当することになる。

当時のコータは、基板中央にレジストを滴下して回す方式（中央滴下方式）であり、薬液使用効率が極端に低く、改善を求められていた。このような背景から、広範囲に滴下してから回転する方法が考案された。私は、この方式を実現するには、スリットノズル部品しかないと考え、引出しに眠っていた図面と記憶をたどり、改良型スリットノズルを開発し、既存のスピンコータと組み合わせ、ここに「スリット&スピン」というレジスト使用量を従来比1/3に削減したスピンコータが完成した。初号機をお客様の生産現場へ納入し、調整後に初動作させた時は、皆が手をたたいて喜んでいたという光景を今でも覚えている。スリット&スピンで最も難しかったのは、スリットノズルそのものの製作ではなく、意外にもノズル洗浄方法やノズル乾燥防止管理等であった。生産ラインでは、連続で稼動する時もあれば、長時間停止する時もあり、長いノズルの先端を乾燥させることなく且つクリーンに維持しなければ、均一に基板上にプリコート（塗布）できなかった。その後も、お客様の生産現場で起きるさまざまな現象に対して検討、改善を進めることで、ノズルやその周辺の技術が確立し、ノウハウが蓄積していった。

3. コータデベロッパ低迷と復活

スリット&スピンを開発し、これからという時であったが、残念ながら弊社の液晶用コータデベロッパは、全体システムの安定性面で問題が発生し、低迷期に入ってしまうのである。コータ単体機は製造販売を継続していたが、コータデベロッパシステムの販売が困難で、要望があっても満足していただける構成の商品提案ができない時期が続いた。

このような状況を何とか解決したいという技術メンバー有志数名が、声を掛け合って集まり語り始めた。私もその1人であるが、仕事を終え帰宅前に集まるという物好きな連中である。議論に熱が入り、輪も広まり、いつしか“新システム検討会”に発展し、提案が絞り込まれていった。やがてこの提案を具現化するための商品開発プロジェクトが発足し、大日本スクリーン製造㈱の第4世代サイズ向け「液晶用コータデベロッパ」（図-1）として復活を遂げた。

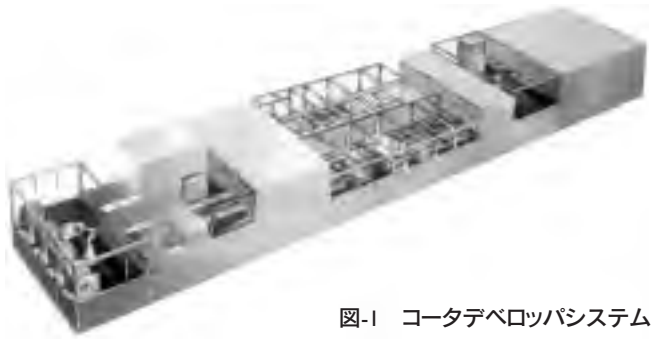


図-1　コータデベロッパシステム

この装置コンセプトでは、従来のスピン処理方式（洗浄、塗布、現像）から脱スピンの方向を打ち出し、洗浄や現像は傾斜搬送やエアーナイフによる乾燥といった斬新なアイデアを採用した。特に“エアーナイフ乾燥”については、その性能について従来の先入観から根強い抵抗があり、市場に受け入れられるまでに多くの時間と労力を要した。結果的に“エアーナイフ乾燥”は市場に認知され、今日においても主流となっている。しかし、当時のレジストコータについては、性能面からどうしてもスピン方式に頼らざるをえなかった。

このころから、いつしか新方式コータへの入れ替えができるようにスリット&スピンに用いるノズルや周辺技術の改良を怠らず、ひそかにその機会をうかがっていくこととなる。こうして新しいシステムを採用したコータデベロッパは、優れた安定性を有し、国内外のほとんどのお客様に受け入れていただける商品へと発展成長していくことができた。

4. 丸秘PJと新型コータの静かな始動

LCDパネルを採用した商品の画面サイズが大きくなるのと同じように、量産用マザーガラスサイズも大きくなり、その度にスピンコータの限界説が話題にされるようになった。経験から、回転性能さえ満足できればレジスト塗布は可能であることがわかっており、第5世代サイズでも大型スピンモータ開発や回転体の軽

量化開発を進めることで、スピンコータの延命化が図れた。そのような状況の中、究極の塗布方法であるスリットコータの技術情報が、業界でも注目されるようになっていた。当社内でも、かねてより要素研究が進んでいたこともあり、商品化を進めることが必要であるとの判断から、私が開発リーダーを務めることになった。注目技術ということで、社内でも開発情報をクローズすべく、意味不明な（私にとっては夢のある名前の）開発コード名やプロジェクト名を付けて技術開発を進めていった。しかし、現実の開発は厳しく、塗布均一性3～4%は得られても、2～3%レベルが安定的に得られず、突破口を摑むのに苦労を重ねた。その間社内からは、先行メーカよりも○○年は遅れている…とか、いつになったら物になるのか?!…と厳しい激励（?）を受け続けた･･･（それだけ大きな期待をかけていただいたと理解している）。一方で、ガラス基板の更なる大型化は進み、スピンコータ改良においては、防護壁があっても身の危険さえ感じるほどの開発作業となり、ますますスリットコータへの期待は高まっていった。そして、解析チームや精密加工技術経験者が参画した特別プロジェクト体制が布かれることとなり、支援環境の充実とともに開発を加速していくことになる。遅れている開発スケジュールを取り戻すとともに、開発費を抑え、理論武装するためにシミュレーション技術を各要素部分に徹底的に活用し、絞り込み試作と検証を実施した。また液の流れや塗布状況を、工夫して可視化することで理論検証し、技術者が納得する中で着実に進めていった。（可視化実験は、苦しい中でも楽しかった実験作業のひとつであり、効果的であった。）また、先のロールコータ（ランドコータ）、スリット&スピンコータで経験した開発経験や実績を利用展開し、これまでの集大成としてリニアコータ®（図-2）が完成した。スピンコータと異なり、本当に静かな塗布装置（無音･無振動）の始動であった。



図-2　リニアコータ®

5. 1 号機から脱スピンコータへ

お客様にリニアコータ®を説明し理解を求めた結果、順次納入されていく第 5 世代スリット&スピン仕様のコータデベロッパに混じって、スリットコータ仕様を1ラインだけ納入させていただくという切符を手にすることができた。折角いただいたチャンスだけに、とにかくどんな内容であっても失敗は許されない状況だった。プロジェクト内部で役割分担を確認し、万全の体制で搬入から立上げに臨み、コータ部はわずか数日で立上げることができ、ユーザーの高い評価を得た。システム全体が安定していたこともあり、1号機は即座に連続稼動の生産機となってしまい、皮肉にも予定していた各種評価ができずに、ただただ順調に稼動する姿を指をくわえて見守るという結果になった。しかし、このような形で1号機が動き始めると、装置の好評は広まり、それに後押しされたように開発の勢いは止まることなく、リニアコータ®の第6、第7世代までの商品化と生産予定までが太い実線で引かれ、現実のものとなっていった。先に納入した1号機は生産耐久性評価用と割り切り、次の第6世代商品機へと開発の軸足を移し注力した。そしてここに、液晶用コータデベロッパの脱スピンシステムが完成した。今日では、スリット&スピンコータ仕様よりもリニアコータ仕様の出荷台数がはるかに上回っている。

6. 続く大型化の波

液晶用基板の大型化は、そのサイクルが短く各社投資ごとにサイズアップする時代になった。第6世代サイズの商品化･納入立上げが完了した後の結果が出る前に、第7世代サイズの商品設計を終えて製作を始めないと、お客様の希望納期に間に合わないという、矢継ぎ早の開発が続いた。単純に言うとスケールアップ開発であるが、寸法格差が大きいだけに、精度確保ができるのか、その前に大きな部材が手に入るのか、加工できる機械があるのだろうか、手に入っても道路輸送ができるのだろうか…という過去に経験したことのない基本的な検討から始めないといけない内容が都度出てくるといった状況であった。とにかく装置が大きいだけに、何種類か試作して、Try&Errorを繰り返す装置開発手法では、開発時間･予算･設置場所…どれをとっても採算が合わないので、机上検討･調査、シミュレーション（図-3）を徹底して繰り返し行い、また最低限必要な部分だけを絞り込んで要素試作･検証し、商品設計へフィードバックするという手法を取り入れて、大型化の波に乗り遅れないように立ち止まることなく開発を進めてきた。そして現在も継続している。

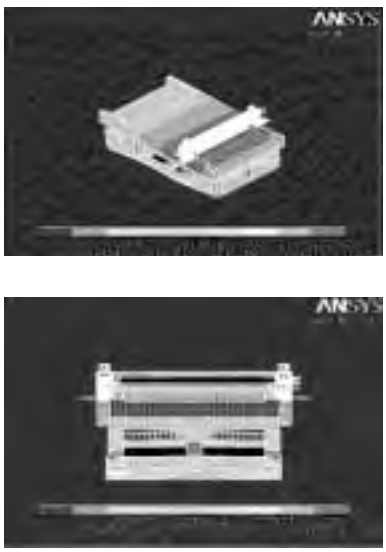


図-3　モーダル解析事例

7. 終わりに

基板大型化の流れはとどまることなく続いており、レジストコータも日々進化を続けている。しかし、基板全面にレジストを塗布する装置としては、省薬液の限界に来ており、今後は全く違う視点で、装置のトータルコストダウンに寄与できる開発を進めることが必要と感じている。ロールコータ⇒スピンコータ⇒スリットコータという塗布技術開発、発展に関われたこと、また開発の機会を与えていただけたこと、そして成果が出るまで忍耐強く任せていただけたことを大変ありがたく思っている。また、装置開発に協力いただけた多くの部材メーカ･パネルメーカの方々にも深く感謝している。これまでの開発経験を活かし、一緒に苦労をしてきた技術仲間とともに、これからも液晶業界の発展に寄与する装置を開発していきたい。

開発秘話：産業用超小型放射光源「AURORA」

株式会社SEN（旧 住友イートンノバ）相談役　髙橋 令幸

1. はじめに

1980年代前半、ULSIのリソグラフィ技術として縮小投影露光法を用いるフォトリソグラフィ技術の進展が目覚ましかった。しかし、限界解像度がサブハーフミクロンへの壁を超えて“光でどこまで微細化が可能か？”という問いには回答がない状態であった。一層微細化の進む1990年代へ向けて、エキシマレーザー、EUV、X線、電子線等を用いる技術の研究開発が盛んに行われていた。何が本命になるか、さまざまな可能性が探求される中で、シンクロトロン放射光（SR）を用いるX線リソグラフィ（X線リソ）も一つの有力な候補とみなされ、半導体メーカーによる放射光源（SRリング）を利用した研究が盛り上がっていた。IBMは自前の小型SRリングをもつX線リソ施設の建設計画を1980年に発表、国内では1984年にNTTも厚木研究所に小型SRリングの設置計画を決定、ソルテックのような共同研究組合の発足も構想され、X線リソへの取り組みが急速に熱を帯びつつあった。こうして、西ドイツのコージイマイクロテック（COSY）社をはじめ、日米欧で小型SRリング開発のさまざまな取組みが始まった。

2. 開発への経緯

住友重機械工業株式会社（住重）は、1970年に大阪大学向けの大型サイクロトロンの製作を手がけ、その後1980年代初頭までに大小20台近い各種加速器を大学や研究機関等に納入して、加速器メーカーの地位を確立した。当時、加速器事業の母体は産業機械事業部にあり、事業基盤の安定化と発展のために産業用や民生用標準機種の品揃えを必要とした。この新規事業開発には原子力開発本部が主体となった。1983年頃から産業用SRリングの市場調査を開始し、1984年には本格的な開発の検討を始めた。開発プロジェクトは、X線リソのシステム（SRリング、光ビームラインおよびアライナーを含む全体）を対象とし、開発の進捗に応じて順次人材の補強を計った。社内の関連部門（加速器技術、原子力関連技術、極低温・真空技術、メカトロ・制御技術等）からの精鋭に加えて大学・研究機関等からも10名の逸材を得て、最終的には総勢約30名のチームを構成した。その中心的なリード役は、住重の加速器事業と歩みを共にしてきた豊田英二郎主席技師（当時）であり、私はこの年住重に入社して、本プロジェクトのSRリング開発の技術責任を担うこととなった。

3. 新しい概念への前奏

1984年当時、世界的には30を超えるSRリングが物性などの研究用として稼動していた。これらはセクター型の電磁石と直線部を組み合わせたリング状のもので、入射用加速器まで含めると大掛かりな装置・施設であったが、加速器技術的には確立されたものであった。当初はこれらを参考にして小型化を狙った最適化を行い、電磁石8個を直線部で繋ぐ周長15.7m（平均直径5m）のSRリングの概念をまとめた。折しも、究極の小型化といわれる単体超伝導電磁石を用いたSRリング（単体超伝導SRリング）「COSY」の開発が西ドイツで行われているという情報がもたらされた。1985年早々再検討の必要に迫られ、対抗上直径1mの真円軌道をもつ単体超伝導SRリングの開発に挑戦することになった。最大の問題点は、強磁場単体磁石内の真円軌道に、いかにして外から電子ビームを打ち込んで安定に乗せるかということであった。このような入射方法に関する発表された知見は、その当時はなかった。この問題について、大学や研究機関の加速器の専門家と意見交換もしたが、有用な知見は得られなかった。しかし、COSYでは、この問題に何らかの解決策を既に見出しているのではないかと考えられた。我々としては、自分たちで新たな方法を考え出すほかはないという思いを強くした。

4. 共鳴入射原理の発見

1985年、産業機械事業部で加速器の物理設計を担当していた高山猛技師（当時）が合流し、この問題を共に考えることになった。そんなある日、思いついたことがあると言って厖大な数式の書かれたノートを彼から渡された。数式の展開に間違いは見当たらなかったが、加速器物理の常識からすれば大胆な仮説に基づいて数式が展開されていた。この方法でうまくいくかどうかは自明ではなく、仮説の検証が必要であると考えた。そこで、この入射方法に基づく単体超伝導SRリング概念の計算機シミュレーションによるフィージビリティ・スタディを実施することとした。このシミュレーションのためには、当時はまだ大型コンピュータの時間利用に頼らなくてはならなかった。住重トップマネジメントの強い関心と理解を得て予算措置が計られ、シミュレーションの実施にこぎ着けた。結果は刮目（かつもく）すべきものであった。入射電子ビームに適切な物理的条件が与えられれば、入射の解があることが示された。新しい入射方法の発見であり、「共鳴入射法」と名づけて特許を取得した。

5. ユニークな要素機器開発

こうして1985年末までにマイクロトロンを入射器とする単体超伝導SRリング「AURORA」の概念設計ができあがった。リング自体は、大きく分けて超伝導磁石系と軌道系の二つの系で構成した。構成要素は、超伝導磁石系が超伝導コイルと鉄のポールとヨークであり、軌道系は超高真空槽とその中の磁気チャンネル、静電インフレクター、パータベータ、レゾナンスジャンパー、ビームガイド、高周波加速空胴、ビーム診断装置等ユニークなものであった。これら機器の本格的な開発は、従来の概念に基づく小型化のやり方とは全く異なった方向を目指したもので、チー



図1 真空槽中に配置されたユニークな軌道要素機器



図2 完成した「AURORA」初号機、単体超伝導SRリングとマイクロトロン

ムが1986年から基盤研究を担う平塚研究所に移って行った。「AURORA」の実現は、適切な物理的条件を与えるべきこれら入射軌道要素機器や超伝導電磁石の開発の成否に懸かることになった。各機器は、新しい入射方法実現のためのユニークな機能に加えて、直径1mの円軌道上ないしはその近傍の極めて狭隘な空間に全て配置しなくてはならないこと、電子から軌道平面内に発せられる大強度の放射光を遮ることなく外部に放出するための仕掛けを要すること等、設計・製作には生半可ではない新たな考案と工夫を必要とした(図1)。実は、「AURORA」の最初の技術発表を、1986年の米国での加速器応用の国際会議で行い、その帰途ブルックヘブン、バークレー、ウィスコンシンなど研究所や大学を訪ねてSRリングの専門家と議論を交わした。誰もが、「AURORA」の独創的な概念には強い関心を示したが、技術上の困難さを挙げてその実現性には疑問を呈した。そんな困難な技術課題を、上記チームが知恵と技術を結集して克服した。要素機器の技術開発は、文字通りステート・オブ・ザ・アートに値するものであった。興味深い秘話がそれぞれにあるが、紙面の都合で省かざるを得ない。ちなみに、上述の西ドイツのCOSY開発では、結局リングへの電子の入射問題を解決できずに、単体超伝導リング方式を断念した。「AURORA」は、世界で唯一の「単体超伝導SRリング」開発となった。

6. 世界最小SRリングの完成

要素機器の開発の進捗に伴って、「AURORA」実現の機運が高まり、プロト機を田無製造所内に建設することになり、1988年に製品初号機を製作し、1989年春から性能実証試験を実施した。入射用マイクロトロンは、150MeVという高いエネルギー故に前例がなく、開発を急ぐために当時世界最高エネルギー(100MeV)のマイクロトロンを有した米国ウィスコンシン大学との共同開発を始めた。しかし、折からの日米半導体摩擦の激化で同大学から開発継続を断ってきた。共同開発は途中で挫折し、結局単独開発を余儀なくされた。思いがけない負荷増大となり、それだけ全体開発スケジュールの遅れが生じた。それでも1989年11月初めには150MeV電子ビームのリングへの入射、650MeVまでの加速と蓄積に成功して、光ビームラインポートからの放射光を観測した。こうしてユニークな単体超伝導SRリングの卓越した性能が実証され、世界最小SRリング「AURORA」が完成した(図2)。光ビームラインとアライナーの開発も成就して、1990年代前半、X線リソのシステムとして半導体デバイスメーカーによるX線リソの開発研究に用いられた。

7. おわりに

住重は、「AURORA」で培った技術をもとに、超伝導並みの強磁場を発生する常伝導磁石を開発し、1995年、世界最小の常伝導レーストラック型のSRリング、産業用「AURORA-2S」(フットプリント:3×5m²)と研究用「AURORA-2D」の開発にも成功した。これによって、より経済効率の優れた放射光源の供給が可能となった。単体超伝導「AURORA」は1996年に立命館大学に移設、「AURORA-2D」は広島大学に設置され、ユニークな研究用SR光源として活躍している。「AURORA-2S」は、元祖「AURORA」の後を受けて住重田無の技術開発センターに設置され、1990年代後半まで半導体用のX線リソ開発に供せられた。半導体分野では、その間KrFやArFなどのエキシマレーザーによるリソグラフィ手法が進み、現在半導体デバイス生産の主役を担っており、X線リソの出番はないままである。

SRを用いるX線リソは、直線性を生かした高アスペクト比の3次元構造の微細加工技術として卓越したポテンシャルを有しており、LIGA、TIEGA®など、マイクロ/ナノ加工プロセスとして、医療やバイオ、半導体や液晶、光学素子、分析装置などの分野のMEMSやキーコンポーネント製作への応用が広がっている。住重では、一度に10本以上のビームラインを利用できる「AURORA-2S」の量産性能を武器に、LIGA&TIEGA®ファンドリーを立ち上げ、さらにそれを超えた事業展開を目指している。

最後に、本開発に多大に貢献し、まだ働き盛りで1999年に急逝した故高山猛主任技師の冥福を祈る。

開発秘話：液晶用レジスト塗布装置

東京応化工業株式会社 プロセス機器事業本部 開発部長　佐合 宏仁

■ 背景

昭和の時代もわずかとなった1980年代後半、シリコンサイクルの大きな谷にみまわれた。半導体の設備投資はことごとく凍結され、化学製品を生業とする社内では、売上比率がいかに低くとも、私が身をおく半導体製造用装置事業の落ち込みは目立った。経費節減が叫ばれ、若干名ではあるが他事業への人事異動も実施された。入社5年目にして、初めて体感した不況である。液晶とのかかわりをもったのは、こんな時期であった。

暇に任せたわけではない。入社以来、装置事業の中でもさらにマイナーなSOGスピンコータを手がけており、何とかメジャーにしたいとの思いから忙しくしていたのである。このころは、本格的なSOGプロセスの認知とともに、スピンコータがヒット商品として世界的な広がりをみせていく、一歩手前の時期にもあたっていた。

■ お付合い

カラーTFT液晶の研究開発が盛んであった関西方面の中堅商社から、1本の電話が入った。「レジストコータが使いものにならず液晶エンジニアが困っている。一緒に話を聞きに云々」いつもの人一倍のお喋りに、つい引き込まれそうになる。

今でこそ液晶テレビが当り前となっているが、当時は、それを本気で唱える人の客観性を疑いたくなるほど、液晶は安かろう悪かろうのイメージでしかなかった。半導体の“産業の米”に対して“産業の顔”と言われ始めるはるか前のことである。

このような代物にかかわる時間はないと思った。しかし、商社からの執拗な誘いにも閉口した。結局、大阪方面の液晶メーカーに向かうことになるが、全くのお付合いのつもりであった。

高名らしいエンジニアの方々と接見した。何せ液晶業界を知らないし、あまり深くも考えていない。それでも、小一時間のお話の中でほぼ様相がつかめた。印象に残ったのは、問題を象徴する『風きり』という言い回しと、私に向けられた『どうせ駄目だろう』と言いたげなエンジニアの目であった。どこの馬の骨かわからぬ者に期待するはずもないが、それでも少々しゃくに触った。

当時のTFT液晶は、半導体製造で用いられるのと同様のスピンコータで、既に、一片が300mmを超える四角形のガラス基板にレジストを塗布していた。その基板の内接円外の領域は、回転による乱流とレジストの表面張力から、どんなことになるかは容易に想像がつく。風きりと表現されていたものである。レジストを綺麗に塗りたいのはわかるが、無謀と思えた。

■ 片手間仕事

既に商社への義理立ては果たしたと思っている。ただ、先の無謀と思える不合理と、しゃくに触った不快感が引っかかっていた。くどいようだが、実は忙しくしていた。それに、開発部署ではないために開発予算はない。抱いてしまった不合理と不快感を解消するために採れる方法は、暇を見つけて、手作り品での簡単な実験を試していくことぐらいしかない。仕方なく、問題を具体的に確認する作業から始めてみた。想像したとおりのことがあらわになると、先のものが見たくなる。他人が既に試したと思えるような比較的安易なアイデアも、暇を見つけては、いい加減な手作りツールで試していった。いい加減なのでスピードだけは速い。しかし、糸口さえも、なかなか見つからない。この段階にくると、先の不合理と不快感が推進力ではなく、自らの興味本位で大型角基板上のレジストの挙動を考えるようになっていた。睡眠時間を多少削ることにはなるが、嫌ならば止めればいい。そんな気楽さの中で始めたつもりが、いつしか積極的に時間を作るようになり、夜な夜な、実験場と加工場を徘徊していたように記憶している。今から思えば、その試行錯誤の中で、無意識のうちにイメージができつつあったのかもしれない。

■ ひらめき

2ヶ月ほど過ぎたある昼下がり、出張帰りの新幹線で遅い昼飯の弁当を平らげ、うつらうつらし始めていた時である。突然、イメージが意識の中に現れた。自分ではそう感じた。途中の停車駅から発車して時速200km以上に加速していく、車内空間にハッとした。

ハッとした瞬間から、頭の中でできあがった突飛なものをすぐに試したい衝動に駆られた。その足で急ぎ退社時刻直前の会社に戻り、女性社員の多い総務へ直行した。果たして、おあつらえどおりの物がそこから出てきた。珍しく真顔をした私に、蓋が付いたクッキーの丸缶を手渡した女性社員の怪訝そうな顔は、今も忘れられない。その夜、半導体用スピンコータのスピンヘッドに取り付けられたクッキーの丸缶は、無造作に直角や鋭角に割った異形Siウェーハ上のレジストを見事に均一に拡げてみせた。あまりにも呆気ない、回転カップの基礎のできあがりである。おそらく、この方法しかないのであろうと直感的に思った。しかし、装置化の難易度の高さは並ではない。多くの問題が次々と浮かび上がり、装置化へ向かうことを躊躇させる。

正直、この先の苦労を考えだすと、せっかくの嬉しさも半減する思いであった。

■ 回転カップの具現化

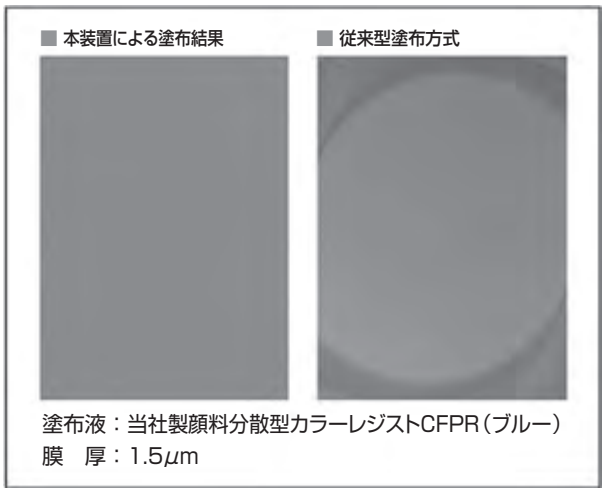
ほどなくして、勤務先に近い神奈川県内に研究所を構えるユーザから、TFTパネル開発目的のレジスト塗布装置の要求が舞い込んできた。悩んだが、反応見たさから回転カップの概念を紹介してみた。予想以上のインパクトがあったのか、気がつけば捕まってしまっていた。小型の手作り実験機から、いきなり製品化を目指すリスクをも負うというのである。人・物・金に極貧の身としては、背中を強烈に押されるようなものであった。

数ヵ月後、大変な苦労の末、1987年末にTFTアレー用、続いて年明けの1988年初頭にCF用の回転カップ式塗布装置を無事に納入することができた。400mmのガラス基板に対応する回転カップとホットプレートベークのみの簡単なものであったが、同研究所は早々と成果をあげた。同年開催のハノーバーメッセに、当時世界最大となる14インチTFTパネルを参考出展したのである。これ以後、カラー液晶の本格生産に向かう大きな流れに巻き込まれていく。

■ 塗布3点セットの開発と事業展開

短い期間ながらもこの研究所に出入りしたことが、本格生産用装置開発の動機づけとなっている。半導体製造装置の経験も手伝い、生産装置に欠如している問題が見えてしまっていたのである。回転カップの欠点をいかに補い、生産用装置に適合させる機能をいかに実現するかであった。実験を再開することにした。例によって、時間を見つけながらの手作り品での実験である。回転カップ→減圧乾燥→基板周縁洗浄(→ベーク)の、いわゆる回転カップ技術を核とする塗布3点セットの概念を確立したのは、1988年末のことである。回転カップはもとより、減圧乾燥も突飛である。顧客が実際の大型ガラス基板で確認できる試作・デモ機がなければ、販売に繋がらないと悟った。前述したように、開発予算は0であるが、一握りの応援者のためにも、後には退けなかった。社内に開発予算の捻出を申請し、なんとか予算外で承認された。

試作機が体を成してきた1989年6月ごろ、設置スペースの問題が発覚した。このころは半導体も忙しさを取り戻し、出荷前装置が並んだクリーンルームに、大きな液晶装置を設置するスペースが暫く確保できなくなっていた。急遽目をつけたのが、改装したばかりの材料事業部の開発用クリーンルームであった。車で5分程度の距離である。すぐには研究設備の搬入計画はない。担当役員に無心し了解を取り付けたまではよかったが、搬入が厄介であった。鉄製の大扉と枠を外し、剥き出しになった壁にも手をつけたのである。怒られないわけはない。しかし、怪我の功名があった。試作機の見学と実験のために、液晶業界重鎮の多くが当社主力の材料事業部を訪れた。材料事業部の担当役員も接客にあたるため、社内中枢への理解度がより深まり、液晶業界の標準装置となるとの顧客評価も、たちまちのうちに社内に広まった。このころから、社内においても液晶装置事業が現実的な話題となり、中途採用の要求に応えてもらえるようになる。これを機に、平成の時代から始まるカラー液晶生産の創成期より、社内の液晶装置事業が興っていった。1990年末にTFT用、翌1991年にはCF用レジスト塗布装置の出荷を開始した。いずれも関西方面からのスタートとなり、前述の中堅商社には恩返しする形となった。以後、さまざまなサイズのガラス基板を流品するCF業界を中心に、なくてはならないシステムとして認知されていった。時は21世紀となり、ノンスピン方式が台頭するまで、回転カップを核とした塗布3点セットが、液晶業界のデファクトスタンダードとして活躍することになる。なお、減圧乾燥については、ノンスピンの時代となった現在においても、いまだに活用されている。



回転カップと従来スピンコータの比較写真

■ おわりに

液晶進展の大きな流れに巻き込まれていく過程で、社内外のさまざまな方々との出会いを得た。顧みれば、そのタイミングの妙が非常に意味深く、感慨深くもある。人生の中でも得がたい体験をさせていただいたと思えてくる。

それらの方々の中に、本稿の依頼主でもある当社の開発本部長がいる。クッキーの缶について書いたが、彼にとってはダンボールということになっている。さすがにダンボールは回せない。この話になるたびにクッキーの缶と訂正するのだが、次に会うとダンボールに戻っている。彼は以前、当社の将来を決定付ける重要な商品を開発しているが、当時の環境はお世辞にもよいとはいえなかったと聞いている。施設の高額化が当り前になった現在の開発環境だからこそ、若い開発者に伝えていきたいことがあるはず。その伝えたいことの一つに、例えとしてダンボールの方が都合よく、インパクトのある話となるのであろうと邪推してしまう。仮にそうだとすると、まさに嘘も方便であり、光栄と思うべきなのだろう。

開発秘話：縦型SiGeエピタキシャル成長装置開発の道のり

株式会社日立国際電気 半導体装置システム研究所 所長　国井 泰夫

半導体デバイスを構成する半導体結晶の応力歪は、従来は結晶欠陥等の原因として嫌われるものであったが、近年は歪による半導体伝導メカニズムの変化を積極的に利用してデバイス性能を向上させるものとして注目されている。Si結晶に歪を印加する有力な方法に、Si基板の一部にSiGeを選択的にエピタキシャル成長させる方法がある。当社では、SiGeエピタキシャル成長を低コストで実現するため、半導体デバイス量産工場で広く採用されている縦型LP(減圧)-CVD(化学気相成長)装置をベースとして、縦型SiGeエピタキシャル成長装置を開発した。以下では、この開発の道のりを振り返る。

当社が縦型SiGeエピタキシャル成長装置開発を開始したきっかけは、東北大学電気通信研究所の室田淳一教授からの装置開発提案であった。当社と室田教授とは、1970年代中ごろからの長く緊密な関係にある。当時、電電公社武蔵野電気通信研究所でLSIプロセス開発にあたっていた室田教授と、世界初の64kbit MOS LSI対応クリーンAP(常圧)-CVD装置、量産化と大口径化を指向した横型LP-CVD装置や枚葉LP/UHV(超高真空)-CVD装置を開発した。特に枚葉装置の開発は世界に先駆けるものだった。黒河治重技師長をはじめ、その後当社の半導体製造装置ビジネスの中核となる人々が、これらの装置開発を担当した。室田教授は、この反応炉構造の異なるCVD装置開発とデータ収集を行う中で、薄膜成長特性が反応炉の構造によらず原料ガスの分圧・温度・基板材質のみで決定される条件が存在し、それがラングミュア型の単純な反応速度式で表されることを見出した。さらに、世界初の低温選択Geエピタキシャル成長の実現等を通して、原料ガスの表面吸着・反応の阻害要因が反応雰囲気中の水分等の不要不純物によるものであることを明らかにしたのである。

1985年、NTT厚木研究所に所属していた室田教授は、CVDの基本メカニズムを学問的に極めたいという熱い気持ちから東北大学電気通信研究所に移り、ウルトラクリーンCVD技術の開発を開始した。当社は東北大学にウルトラクリーンLP-CVD装置を納入するとともに、有望な若手社員を研修生として継続的に送り込み、ウルトラクリーンCVD技術をいっしょに開発して、その真髄を身につけようと努めた。室田教授には、技術的指導だけでなく、研修生の人間性をよく理解して、それに沿った人格育成指導もしていただいた。個人的なことでお世話になった社員も多い。

納入した装置は従来のLP-CVDの考えでプログラミングされており、室田教授のコンセプトとは異なる点が多かった。研修生がプログラミング技術を習得し、細かなソフトの修正を行い、室田教授流の装置動作を実現した。低温エピタキシャル成長技術開発のきっかけは偶然のもの(セレンディピティ)だった。ウルトラクリーンLP-CVD装置でSi基板上に形成したノンドープSi薄膜に熱処理によりリンを拡散させる実験を行ったところ、酸化膜上に堆積した場合と比較してリン濃度が十分上がらないという結果が得られた。この原因を追究したところ、多結晶のはずのSi膜が単結晶になっている、つまりエピタキシャル成長しているということがわかった。ウルトラクリーンLP-CVD装置が予想以上にクリーンであり、Si表面にエピタキシャル成長を阻害する自然酸化膜が成長していなかったのだ。この結果に着目して高品質の低温エピタキシャル成長をめざしての研究が開始されたが、当初は来る日も来る日も膜成長したウェーハがきれいな単結晶にならず、ヘイズ(曇り)を発生し、膜厚分布や抵抗率分布も良くなく、また良くなっても再現性がない等の問題が続いた。長い忍耐の日々だった。エピタキシャル成長を阻害する要因を一つずつ除去していき、やがて良質な低温エピタキシャル成長がウルトラクリーンLP-CVD技術で可能となった。

図1は、現在も室田研究室で使われているウルトラクリーン横型LP-CVD装置の構造図である。1980年代にはあまりLP-CVD用として用いられていなかったターボ分子ポンプ(TMP)を採用し、常圧からTMPで真空引きが開始できるような工夫がしてある。当初はウルトラクリーンUHV-CVDも追求されたが、多くの実験から、0.1～1Torr程度の減圧領域にウルトラクリーンな表面と良好な成膜を実現する条件があることが明らかとなった。

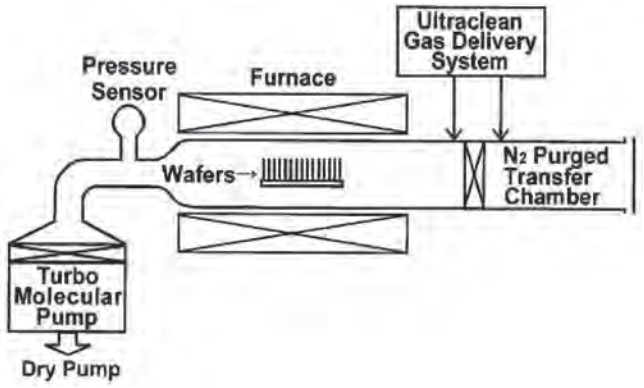


図1 ウルトラクリーン横型LP-CVD装置の構造図

この圧力領域では気体分子の平均自由行程が短く、排気側に存在する汚染物質の上流側への移動を、上流からのウルトラクリーンなガスの流れによって抑制できる。ウルトラクリーンUHVの実現には多くのコストと手間がかかるので、減圧領域でウルトラクリーンが実現できることは実用上大きな意味があった。写真1は、ウルトラクリーンLP-CVDで形成された低温選択Geエピタキシャル成長の様子である。成長条件により、成長端形状を制御することもできる。UHVを必要とする分子ビームエピタキシャル成長装置でなく、広く量産で使われているLP-CVD装置と同様の装置で低温のエピタキシャル成長が実現できることは、当時大きな驚きであった。室田研究室では、ウルトラクリーンLP-CVD装置を用いて、上記のGe以外にも、Si、SiGe、CドープSi、CドープSiGeのエピタキシャル成長や原子層ドーピング技術の開発を進め、多くの論文や国際会議での発表を行ってきている。

2000年になり、室田教授の研究成果に着目した米国のデバイスメーカーが、SiGeエピタキシャル成長を用いたヘテロバイポーラトランジスタの本格的な実用化をめざした共同研究を、室田教授に提案してきた。室田教授は当社の富山工場を訪れ、多くの幹部と面談して、共同開発した技術を使って量産に適用できる装置を開発したいとの熱い思いを伝えた。筆者は、NTT研究所でSi・SiGeエピタキシャル成長関連のプロセス研究を18年間行った後、1998年に研究に使っていた装置のサプライヤーである当社に移り、2000年にはエピタキシャル成長装置関連の開発設計グループ長を務めていた。それまで同様な装置開発の話に対し、低温エピタキシャル成長を量産で行うことの困難さを考慮して開発を見送ってきた当社であったが、開発スタートの条件（人材・基本技術・市場）がそろったと判断して、まず既存の200mmウェーハ用ロードロック式縦型装置に簡単な改造をほどこして、量産向けSiGeエピタキシャル成長技術開発をスタートさせた。

小さなウェーハでは技術が確立されたと思われたSiGeエピタキシャル成長技術だったが、200mmウェーハで量産レベルの性能を確立するには、さらに多くの困難があった。室田研究室で技を磨いた社員を中心としたプロセス担当者たち、装置開発に多くの経験をもつハード設計者たちと、室田教授が多くの議論・装置の改良・実験を重ねて、デバイスメーカーの評価に耐えるレベルまでの技術を立ち上げた。この成果をもとに、営業部隊と協力して、先の米国デバイスメーカーをはじめとした国内海外デバイスメーカーへの技術プレゼン・成膜デモを開始した。しかし、多くのデバイスメーカーではすでに枚葉式SiGeエピタキシャル成長装置を用いたプロセスが確立しており、これと同じ成膜結果を縦型装置で実現するには、さらなる改良・チューニングが必要とされた。それに費やす時間の中で、各デバイスメーカーの開発方針の変更や、大きく伸びると思われたSiGeヘテロバイポーラトランジスタ市場の変化があり、これらに対応した新たな開発が必要となった。この間に、さらにクリーンレベルを向上させた200mmウェーハ用縦型SiGeエピタキシャル成長装置、300mmウェーハ用縦型SiGeエピタキシャル成長装置を新規に設計開発し、成膜前工程や成膜後評価に必要な周辺装置整備への投資を続けた。現在は、最初に述べた選択SiGeエピタキシャル成長の応用等を中心に、各デバイスメーカーへの展開が進行しており、近い将来に当社のビジネスを支える製品の一つになると期待されている。

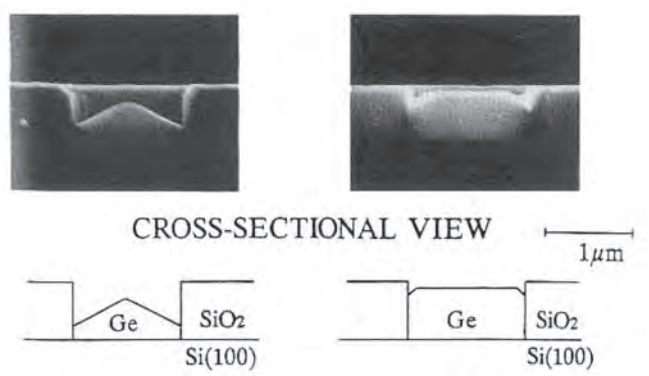


写真1　選択Geエピタキシャル成長（成長温度～350℃）の断面SEM写真（左）：GeH4分圧～0.2Paの成長，（右）：GeH4分圧～10Paの成長

本装置の開発期間は本格スタートからは数年間であるが、室田教授のウルトラクリーンCVD技術開発スタートからはすでに20年以上の年月がたっており、新規な技術の開発・実用化に要する時間の長さを実感している。開発に携わった社員の期待に応えたがんばりに感謝し、そして室田教授の研修生のDNAを見た人間味あるご指導にも重ねて感謝したい。また、本技術の評価にご協力いただいたデバイスメーカーの方々にも深く感謝したい。

よく言われるように、このような長い研究開発にかかるコストとリソースをすべて一企業が負担することは困難である。大学や各種研究機関と装置メーカー、さらにはユーザーとなるデバイスメーカーとの共同開発はますます重要になっている。当社には、縦型装置を中心とした量産技術の新しい応用を期待する開発提案が数多く寄せられているが、このような期待に応えるためには「人と人との新しい出会い」「技術と技術の新しい出合い」がとりわけ大切と考え、そのような機会を増やす努力を続けている。

開発秘話：半導体工場水処理のクローズドシステム

栗田工業株式会社　電子営業一部　専門部長　中川 隆生※

1. はじめに

現在の超純水装置は排水の回収再利用を組み込むことが当然のこととなっている。その原点であったと考えるクローズドシステムへの取組みについて振り返る。30年ほど前のこと、営業担当の筆者、設計等の弊社担当者、そしてお客様の担当者も皆、団塊世代の若かりしころの取組みであった。その後の弊社の躍進を支え、超純水業界でのトップメーカーへと飛躍する出発点となった取組みであったとも考えている。

2. 当時の状況

1970年代後半、日本のDRAM量産が本格化し半導体産業が爆発的に発展しようとしていたころ、超純水市場もその後急拡大する草創期の時代であった。そのころの超純水装置はRO・UF膜が部分的に試行され始め、超純水水質の規定方法や分析法も試行錯誤の状況であった。したがって、不純物のない飛びっ切り良い水を造ることに精一杯で、汚れた排水からきれいな超純水を造るなんてという感情的な拒否反応もあり、論外との考えが大勢で、半導体工場では排水回収再利用は実績もなく検討もされていなかった時代であった。一方、当時の弊社は半導体業界にまだ注目しておらず、他メーカーの実績が圧倒的な市場であった。

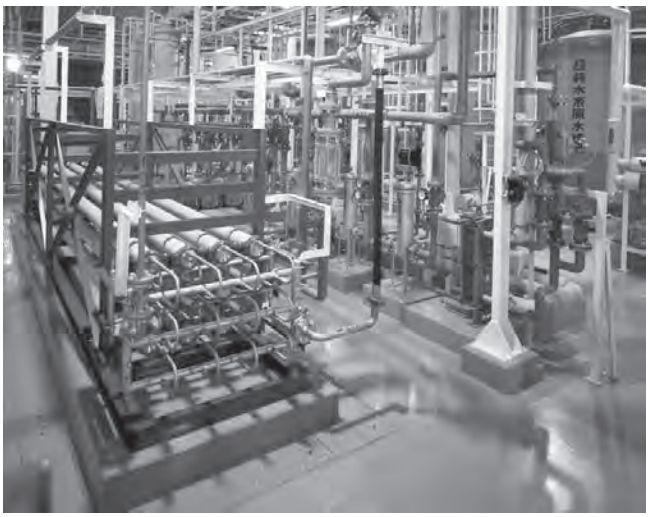
3. 取組みへの始動

その当時、半導体業界では最も勢いがあり伸長著しい、自称「鼻っ柱の強いA社」から「次世代にも通用する半導体工場を建設したい、超純水を含む水処理装置はクローズドシステムとし無排水工場とする」との構想で相談が舞い込んできた。半導体工場では排水の回収再利用さえ実施されていないのに、なんといきなりクローズドシステム。極端に言えば、すべて開発しながら納入するという離れ業が必要であった。「知らぬが仏」で、半導体に関してよく知らないことが幸いし、へんなしがらみや束縛もなかったことにより、自由で大胆な発想の取組みを展開できたと考えている。粋が良くて怖いもの知らずの30歳前の若い世代が「行け行けどんどん」で突っ走り、諸先輩はリスクを見極めバックアップするという暗黙の連携があったこともまた確かであった。まさに団塊の世代が若いころ飛躍に挑戦し、次代を担えるようになった継承の場であったとも言える。

4. 取組みのエポック事項

1）膜を主体としたシステム構築

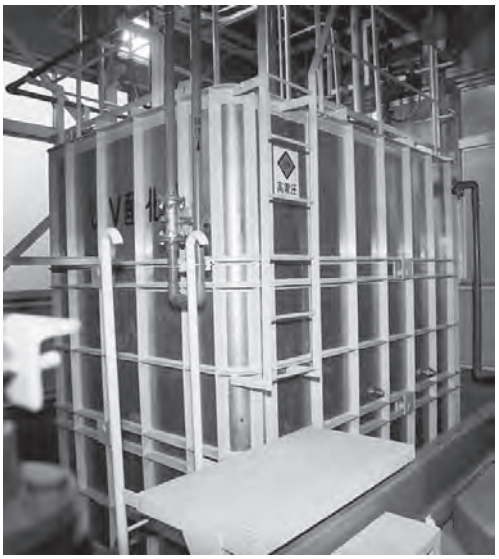
基本構想の段階でRO（逆浸透）膜・UF（限外ろ過）膜ずくしのシステムを提案した。クローズドシステムの場合、分離除去した不純物および分離除去するために使用した薬品が最終的には結晶塩等のスラッジとなり、産業廃棄物として場外処分となる。従来から使われているイオン交換式純水装置は、分離除去する塩量以上の薬品量を使用する。そこで、薬品を使用しないRO膜をとことん組み合わせて使うシステムとした。この思想をA社が非常に高く評価し、その後検討を進める基本コンセプトとなった。しかしながら、実行に向け条件を詰めていくに従い、現実にはイオン交換樹脂とRO膜・UF膜を組み合わせた装置とならざるを得なかった。この基本形は、現在の超純水装置でも変わっていない。また、その後の種々特徴を持った膜が開発され適用されるようになった一つの出発点であったと考えている。このコンセプトが生かされた、電気で脱塩する純水装置・K-CDI®がその後開発され、現在多数の装置が稼動中である。



ROスキッド

2）UV酸化装置

排水を回収再利用し循環使用する場合、有機物の分離除去もしくは分解除去が必須である。UVによる有機物分解装置の試行が始まった時期で、実用装置として本格稼動した1号機であったと思う。弊社は、UV酸化で有機物分解し水を回収利用するパイロットテストを実施していた。その成果を半導体の洗浄排水へ水平展開するべく適用テストを実施した結果、実用可能と判定された。勇んでA社に、このUV酸化による有機物分解を繰り返し提案説明するものの、いつも分かったのか分からないのか反応薄で、UV酸化の説明はもういらないよと言う態度であった。クローズドシステム、しかも超純水装置にはキーとなる技術であり、

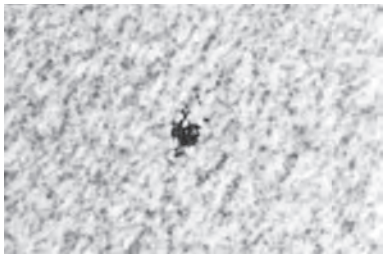


高圧UV酸化装置

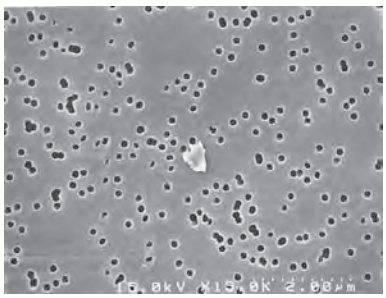
A社に納得理解してもらえたのか不安なままであった。ところが、後から分かったことであるが、半導体製造のリソグラフィーではUVを多用しており、UVによる有機物の分解に関してはA社は熟知しておられたのである。まさに釈迦に説法であった。その当時のUV酸化は、高圧UVランプに酸化剤としてH_2O_2を使用するもので、ランプは20kWと大容量であった。現在では酸化剤を使わないUVのみで酸化分解する低圧UVランプが常用されており、UV酸化は現在の超純水装置に必須の技術となっている。

3）微粒子

当時の超純水は、半導体パターン最小寸法の1/10粒径以上の水中微粒子数を規定し、粒径0.2～0.5μm以上の水中微粒子個数を保証することが一般的であった。しかしA社からは、将来を先取りした、0.1μm粒径以上の微粒子数保証を求められた。当時の微粒子測定は、光顕法（2～3千倍の光学顕微鏡で観察）の解像度上0.2μmの観察が限度で、0.1μmを判定することは非常に困難であった。そこで、契約時には微粒子の測定方法を別途協議の上決定としていただき、ご注文をいただいてから装置完成までの間に確立するという、今では考えられない取決めと進め方であった。何としても測定法を確立する必要があり、お尻に火をつけられた状態で、光顕法の精度を上げるべくお客様と顕微鏡写真を何度も見比べ唸っているばかりであったが、幸いにも弊社技術陣が各段に精度が高いSEM法（電子顕微鏡）を確立し、ことなきを得た。現在でも正確な微粒子測定はSEM法がスタンダードになっている。ところで、この微粒子測定に関して二つの秘話がある。すでに30年も前の話であり、時効ということでお話しする。一つは、「お客様の光顕写真と弊社の光顕写真を見比べると、弊社の写真はいつもボケている」と内心思っていたところ、実は弊社の光学顕微鏡が最先端品でなく精度が悪かったことが後から判明した。しかし、まさに禍福転生、弊社の技術陣は光顕法では精度が悪いと早々に見切りをつけ、SEM法の開発に専念したのである。もう一つは、当時は16K DRAMの量産が始まったころで、半導体パターン最小寸法は5μm、微粒子粒径0.1μmが要求される最小パターン寸法1μmの半導体は（なんと10年後に量産になった）1～4M DRAMであった。弊社はまたしても半導体のことを知っていなかった。お客様から0.1μm粒径の微粒子測定が必須と言われ、素直に信じ、何としても0.1μm粒径の微粒子測定法を確立せねばと必死になって取り組めたのである。半導体のパターン寸法を知っていたら、「0.2μmの測定ができれば充分ではないか」との折衝に注力し、0.1μmの測定法開発はおろそかになっていたのではないかと思っている。



光顕写真



SEM写真

5. 終わりに

現在、環境への配慮がより強く求められ、電子関連工場ではゼロエミッションの適用が大いに伸長している。本取組みはその原点となるものであったと思っている。排水に排出される薬品・材料等の種別区分、排水を無機系と有機系、濃厚系と希薄系に分別する等、現在も基本となる進め方の原形が確立された取組みであったとも考える。濃厚廃液に適用した蒸発濃縮装置は当時ほとんど実績がなく、稼動後に問題が各種発生し、安定稼動には苦労した。他にも予期せぬトラブルが発生したが、工場操業にご迷惑をおかけすることがなかったことは幸いであった。当時のA社のキーマンが「駄目であっても現状より悪くならないで、良くなる可能性があるならトライしよう」といつもおっしゃっていた。若きしころの団塊の世代が、そのような応援のもとで大きな挑戦にトライし、今日の超純水装置の起源ともなるシステム構築に対する取組みであったのではないかと考える。

※肩書きは2006年12月末日のものです。

開発秘話：デバイス配線微細化とPVD成膜技術の競争

株式会社アルバック 半導体技術研究所 第3研究部　豊田 聡

1. デバイスへのCu配線の導入

1997年9月末に米国IBM社がCu配線技術を発表したことで、世界のデバイスメーカーがCu配線の技術開発にしのぎを削り、LSIの高速化競争に拍車がかかった。各社はこの新しい配線材料の先行開発段階で信頼性を獲得し、一層デバイスの微細化を加速していった。ご存知のように、Cu材料の有効性は従来のAlを用いた配線に比べての1）配線低抵抗化による遅延の削減＝デバイス高速化　2）配線微細化に伴う電流密度の増大に対応するエレクトロマイグレーション耐性向上＝配線信頼性向上にある。このCu配線形成に対し、成膜方法としてスパッタを用いたリフロー技術、CVD（Chemical Vapor Deposition）法を用いた埋込み技術などが研究されていたが、どれも一長一短があり、装置改良や原料ガスの探査が続けられていた。

このような各社の技術開発の中で、IBM社より1998 IEEE International Interconnect Technology ConferenceでCu成膜にメッキ埋込み法を使ったデュアル・ダマシン・プロセスが報告され、完成度の高い内容であったことから、各社の開発方向がメッキ埋込みに集約されていった。しかし、この配線工程技術は、半導体製造装置メーカーに対して厳しい要求を突きつけるものであり、0.2μm、深さ0.8μm（アスペクト比4）の微細なホールの側面、底面に均一なバリア膜/Cuシード膜の被服を実現しなければならなかった。0.5μm時代より長く使用されてきたLTS（Long Throw Sputter）も根本的な課題から限界が見えてきた。

我々アルバックは、先端デバイスメーカー殿と共同で、0.13μm対応を目指した新しいスパッタ技術を開発した。新技術SIS（Self-Ionized Sputter）は、従来のLTSにイオン化スパッタの要素を含めることで技術的限界を越え、サブ-0.1μmに達した現在でも量産工場で使用され続けている。

SISは、より微細化の進んだ配線パターンに均一なステップカバレッジを実現することを可能にした。

2. イオン化スパッタへの切替え

システムの概略を説明する。最大の特徴は、①自己保持放電（プロセスガスなし）でのCuイオンの効率的な生成　②イオンリフレクタと名付けた電極（シールド）とウェーハステージでの負バイアス印加機構の搭載にある。

従来のLTS技術は、ウェーハ-ターゲット間距離を広げ、成膜圧力を下げることで粒子の平均自由工程を伸ばし、優れたステップカバレッジを実現した。しかし、LTSの唯一の欠点は、ウェーハ周辺部でのステップカバレッジの低下である。このLTSの欠点を、SISはイオンスパッタを用いることで補った。

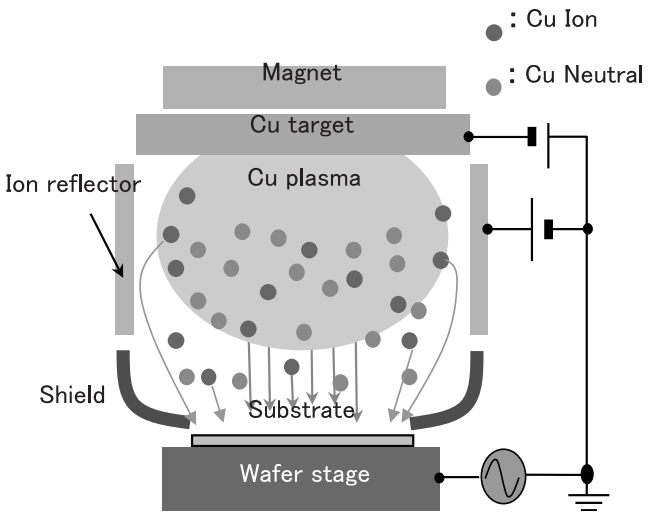


図1　Schematic diagram of SIS apparatus

SIS技術（図1）について紹介する。先に記したように、SISの特徴は、①自己保持放電の採用である。この現象自体は古くから知られているが、発生には大電力供給での放電が必要であり、制御性が悪かった。我々はマグネット設計の最適化を進めた結果、マグネトロンスパッタ中のCuイオン生成量が最大限に高まり、大電力を供給する必要なく自己保持放電を達成した。自己保持放電の結果、生成したイオン成分はすべてCuイオンになる。さらに、②ターゲット近くのシールド（防着板）に正電圧をかけることで、周辺に逃げていたイオンを収集し、ウェーハに垂直に入射するようにして、ウェーハ外周へのイオン供給量を高めた。加えてウェーハに負バイアスをかけることにより、Cuイオンをウェーハに引き込む機構を搭載した。増大したCuイオンを引き込むことで、ホール底のカバレッジを増加させることができる。加える負バイアスを強くすれば、入射したCuイオンがホール底に堆積したCuを再スパッタするため、ホール側壁のカバレッジが増加する。同時にホール底は削られ平坦になるため、ウェーハ全面のホールにおいて被覆形状を均一にすることが可能となった。

スパッタ方法の違いが後工程のCuメッキ成長（ホール埋込み）に与える影響を比較したSEM写真を、図2に紹介する。LTS法を用いた時は、ホール上部までしかCu埋込みが達成しておらず、スパッタ膜のホール内部での被覆形状がいかに均一性を要求されるかがわかる。特に、ウェーハ外周部に存在するホールでは、スパッタ膜形状に起因すると思われる非対称な埋込み不良が

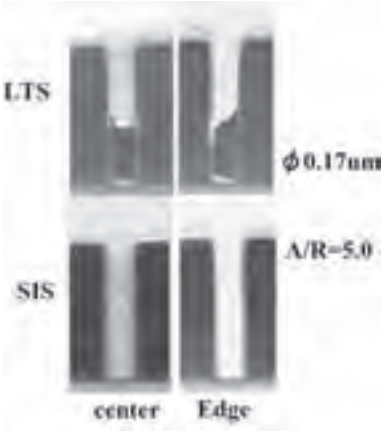


図2 EP Filling Performance by using LTS Cu-seed vs. SIS Cu-seed

観察された。これに対し、SIS法を利用して初めて十分な埋込み特性が得られることを示している。

3. sub-0.1μmデバイス配線の壁 ー日々の観察から新たな発見ー

0.18-0.15μmデバイスからCu配線に採用されたSISだが、デバイスはすぐに0.09μmデザインのデバイスに対応しなければならなくなった。LTSからSISに装置進化させた我々は、SISの課題に直面する。基板に印加するRFバイアスによりホール内のカバレッジが保証される代わりに、ホールの入り口付近の膜を削り、オーバーハングができることであった。オーバーハングはメッキ埋込み時のパターン開口塞がり（ピンチオフ）を招く。RFバイアスを印加しなければホール内のカバレッジが不足する一方、RFバイアスの印加を強くすればオーバーハングが顕著になるというトレードオフの関係となった。

我々はまず、詳細な現状分析を進めた。いろいろな形状に対する被覆膜の形容変化について観察する中で、Cu下層のバリアTa膜のパターン開口部における張出し上層Cuのオーバーハング形状を助長していることを突き止めた。

さらにTa膜のRFバイアスに対する変化を観察し、RFバイアスパワーに対してカバレッジ形状は単一な変化ではないことに気づいた（図3）。ホール開口部においてバイアスパワー増大とともに、オーバーハングの張出し角度は大きくなりながらホール内へ張り出し位置を変えている。バイアスが小さいほど開口を広く確保でき、バイアスパワーの増大とともに開口径は小さくなっている。

また、ウェーハエッジに位置するホール内部では、バイアスパワーの増大とともにカバレッジ増大が見られるが、形状は一定ではない。バイアス印加とともに形状対称性を改善していく傾向が見られていたが、さらに強いバイアスパワー条件では、膜厚の逆転、対称性の悪化に転じている。

つまり、微細パターンに対しては単一バイアス条件のみで被覆を行い、要求されるカバレッジ形状を獲得することは極めて困難であると理解した。特にホール開口部に対するオーバーハング形状制御は、RFバイアスにより変化する張出し位置や張出し形状を利用したRFパワーモジュレーションの導入に辿り着いた。成膜中にRFバイアスパワーを変えていくことによって、オーバーハングを最小に抑えながら、ホール内壁のカバレッジアップと形状均一化を両立させていった。

図4は、モジュレーションSIS技術を用いた70nmホールに対する埋込み結果である。サイドカバレッジを保ちながらオーバーハングがなくなったことで、さらに微細な70nmホール埋込みを達成している。

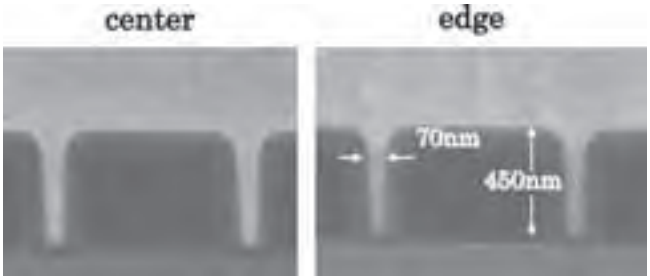


図4 EP Filling Performance by Modulated SIS Cu-seed for 70nm hole

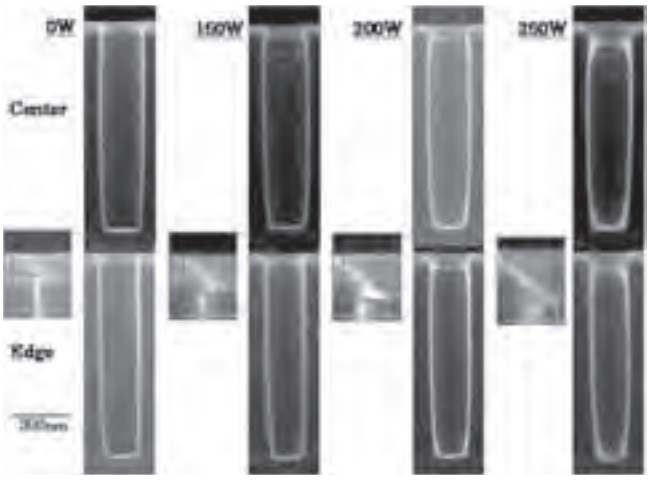


図3 Step Coverage of Standard SIS Ta(RF Bias Power Dependence)

4. 結語

我々装置メーカーは優れたハードウェアを提供することは当然であるが、装置技術のみでなく、成膜方法やレシピについても提案する必要がある。

このSISは好例であり、イオンスパッタを究極まで高めた装置技術に加え、被覆形状を制御するモジュレーション技術の導入が、sub-0.1μmデバイス量産適用を可能にした。

また、LTSという低圧放電技術を持っていたアルバックが、先端デバイスメーカー殿のご指導とご協力をいただいたことが、短時間での装置化につながったと考えている。また、多くのデバイスメーカーに使用していただく機会に恵まれたことが、装置完成につながったことは言うまでもない。

本装置の開発・性能向上にあたり、多くのご指導をいただいたお客様はもとより、ご協力いただいた多くの関係者皆様に心より御礼申し上げる。

開発秘話：マルチチャンバプラズマCVD装置の開発と背景

サムコ株式会社 基盤技術研究所 所長　立田 利明

今から30余年前、正確には1973年、第4次中東戦争が勃発した。OPECは原油生産の削減および公示価格の引き上げを実施、さらにイスラエル支援国への禁輸政策を断行した。そして世界中がオイルショックの渦中にあった。わが国ではトイレットペーパー騒動といえばわかりやすいと思うが、巷ではガソリンや灯油価格の高騰、さらに石油関連商品が店頭から消えていった。その翌年、政府はサンシャイン計画をスタートさせ、国を挙げて、石油に代わる代替エネルギー確保のため太陽光発電、風力発電、地熱発電、原子力発電等々の開発支援に乗りだした。

以前から太陽電池に関しては主にカルコゲナイド系、結晶シリコン系、化合物系等の太陽電池の研究が進められていた。しかしながらその製造には、比較的大きな電力エネルギーを要するといった問題を抱えていた。このため、さらにエネルギー消費の少ない太陽電池の開発が望まれていた。

おりしもその翌年1975年に、英国ダンディー大学のSpearとLecomberらは“アモルファスシリコンの置換型ドーピング”と題する論文を発表した。これまでアモルファスシリコンの価電子制御は不可能とされていたが、彼らはそれをみごとに覆した。

これをかわきりに、この分野の多くの研究者らは、低消費エネルギー、低消費材、大面積化、軽量化等が期待できるアモルファスシリコン太陽電池の研究開発にしのぎを削ることになった。学会等でも発表件数が急増し、この分野の先頭で活躍され、後に当マルチチャンバプラズマCVD装置の開発で大変お世話になった、当時大阪大学の浜川教授、東京工業大学の高橋教授、同じく小長井助教授、電子技術総合研究所の松田先生、日立中央研究所の右高氏、三洋電機の桑野氏らの発表会場では、聴講者が廊下にまであふれ、熱い議論が戦わせられるほどの盛況ぶりだった。そのころ海外では、RCAのCarlsonらは低温プラズマCVD法で変換効率5.5%のアモルファスシリコン太陽電池の製作に成功しており、国内でもますますその研究開発に拍車がかかった。

そのころ、創業間もない当社は、京都南部の伏見大手筋商店街傍の雑居ビルに1階の駐車場スペースをガレージ工場に（写真1参照）、その3階に事務所を構え、主に研究用途向けのシリコン窒化膜や酸化膜およびプラズマ重合用の小さなプラズマCVD装置の開発から製造販売を始めたところであった。私が当社にお世話になったのもちょうどこのころで、社員は社長を含め総勢5、6名程度であった。小さいとはいえ、企業として機能するため必要最小限の役割分担はきちんと整備され、必要に応じてその都度プロジェクトを組織し、効率的に事業運営されていたのが印象的であった。また当時、プラズマ化学の産業への応用技術に関してはまだ創生期のころで、社長の辻が米国NASAで培ってきた低温プラズマ技術を何とか世の中に活用してもらいたいという意気込みが社内にみなぎっていた（現在でも“薄膜技術で世界の産業と科学に貢献する”を社是として根付いている）。この志は、現在もそうであるが、社内だけでなく、当時この分野で活躍している研究者ら、そして日ごろお世話になっているユーザー様を対象に、この分野の第一線で活躍されている大学や企業の先生方による最先端分野の講演セミナーの主催、プラズマ化学研究会等へのメンバー参加、それにセミコン・ジャパンやSEMICON Westへの積極的な出展、自然な形での産学連携など、具体的な形で実践されていた。こうした活動のおかげで、この分野における多くの人脈が育まれ、当社の知名度も徐々に向上していったのだった。また、地域では行政支援のもと、地元の中小企業、金融機関、大学等が結集し、地域企業が中心となったハイテク懇話会や異業種交流プラザといった、現在の産学官連携事業の走りともいえる地域活性化事業が発足し、積極的にこれらに参画した。これらの背景が、今回のテーマであるマルチチャンバプラズマCVD装置の開発に必要な資金支援や産学官の連携に結びつき、新技術や装置開発に大きく貢献したのだった。



写真1　創業時の本社工場

当時、アモルファスシリコン太陽電池薄膜は、ほとんどの研究室で一台のバッチ式低温プラズマCVD装置を用いて、それぞれp層、i層、n層の成膜を順次同一の反応器で形成されていた。このため、各々のプロセス間にクロスコンタミネーション（相互汚染）が発生し、そのことが変換効率の向上を阻害する原因となっていた。予算が潤沢で装置の設置スペースに十分余裕のある大手企業では、高価な部品や複雑な構造をした大型のインライン形式の連続低温プラズマCVD装置を導入し、研究開発を進めているところもあった。また、米国Plasma Physics社のJohn Colemanらは、現クラスターツールの原型となった連続プラズマCVD装置を開発していたが、これも大型で高価なものであった。1973年ごろの太陽電池の製造コストは、1 W/3万円程度であった。当時からその

最終目標は1 W/100円であったが、現在でも1 W/数100～1,000円程度と、いまだに目標達成に向けて低コスト化の研究が続けられている。このことからも、装置コストは大幅に低減する必要があり、かつ変換効率の高い成膜が可能な軽量小型の多室連続成膜装置が望まれていた。

このような要求と当社のハングリーな環境、つまり狭い研究室兼開発室兼生産現場となるガレージ工場、さらに潤沢でない資金、比較的ハイレベルなプラズマ技術のシーズ等々をマッチングさせれば、上述の要求にかなった装置開発ができるのではないかと開発戦略が練られた。開発目標はp,i,n用としての3室とサンプル出し入れ用の計4室、装置組立て後ガレージ工場から運び出せる程度の装置サイズ（重要）、開発コストは当時可能な資金繰りで賄える程度、そして成膜した太陽電池の変換効率は7～8%以上と設定された。問題は、ハード完成後の実成膜プロセスの実施と得られた薄膜の評価であった。創業間もない当社には、毒性ガスを扱えるインフラや薄膜の評価に必要な測定装置はあるはずもなく、途方にくれたものだった。

幸い当社には、以前からおつき合いさせていただいているいくつかの大学の研究室があった。そこで、東京工業大学の高橋教授にお願いして、装置完成後研究室に持ち込み、実成膜およびその膜評価をしていただくことになった。さて、“いかに性能を上げ、かつ小型、低コスト化を図るか”これらの命題をどう解決するかという思いが、連日連夜私の脳裏から離れなかった。そんなおり、ある休みの日に久しぶりに息子を連れて近くの遊園地に行った。息子がモグラたたきゲームをしたいというので100円コインを入れゲームを始めた。あちこちの穴からモグラが顔をだすのを息子がハンマーで叩くのを見ていて、“そうだ、この動きを利用すれば”とひらめいた。おりしも京都府の中小企業技術改善補助事業の募集があり、渡りに船とばかりにこの開発実現に向けて早速応募し、幸いにも運良く採択された。そして、早々にこの開発プロジェクトがスタートされた。といっても、他の受注装置の生産業務もあり、限られた人数でのプロジェクト推進なので、特に人手の要する業務を除いて、機械設計、電気設計、部品手配、組立ておよび調整作業等を1、2名でこなさなければならなかった。

加工品や真空部品の仕入れ先に関しては、日ごろから取引きのある協力工場や業者さんがあったので問題なかったが、困ったのは電子部品の仕入れであった。これまで使ったことのない部品がこの規模の装置には必要になるので問い合わせると、“代引きでないと取引きできない”と回答されることもあった。当社はこれが縁なのか、現在でも支払いは健全な現金決済による取引きを踏襲している。また、今でこそプラズマCVD装置のエネルギー源である高周波電源は専門メーカーのものを仕入れているが、当時はコスト削減とリスク回避のため、当社オリジナルの真空管式高周波電源を使用していた。現在のソリッドステート式のように万全な保護回路を設けなくても非常に丈夫なのがメリットであった。このことが、その後の当社プラズマ発生技術全般の一要素としての高周波技術の蓄積に大いに役立った。

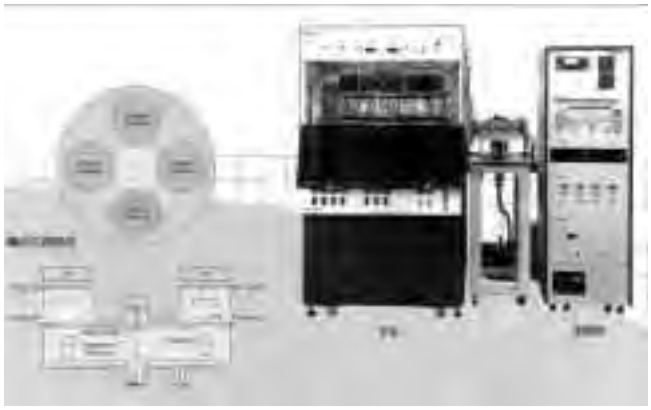


写真2 創業マルチチャンバプラズマCVD装置

何とか部材の調達を終え、ガレージ工場で組立て作業が開始された。重量物を持ち上げるホイストもないので、多分に漏れず人海戦術であった。この人海戦術にも限界があった。なにしろ場所が狭く、多人数が同時に入れないのだった。それでも昼夜を問わず組立て作業に励み、何とか予定通り完成にこぎ着けた（写真2参照）。各種ユーティリティを繋ぎ込み、装置のメインスイッチを入社間もない石川詞念夫（現営業本部長）がONにした。そのとたん、部屋のブレーカーが“バチン”と音を立てて落ちた。あたり全体が真っ暗となった。“誤配線か？”しばらくして思わず皆が吹き出した。それもそのはず、この規模の装置を想定した受電容量は確保されてなかったのだった。

ようやく装置の基本動作に関する調整も終了し、実際に成膜およびその評価のため東工大へ向けて出荷した。現地到着後、装置の立上げ基本動作の確認等を行い、無事納品業務を終えた。その後大学で、成膜の条件出し、そして実際の成膜プロセスの実施および評価の繰返しが行われた。最終的に、当初の目的である変換効率8%のアモルファスシリコン太陽電池が形成され、実際にクロスコンタミが大幅に低減されていることが確認された。この結果は、カナダのモントリオールで開催されたISPC-6（International Symposium on Plasma Chemistry）の国際学会で発表した。多くの質問とともに会場の研究者らから絶賛の拍手を浴びて、本装置が世界的に認知された。ただ、今だから言えるのだが、サンプル移送のため常に同じトレイを使用しており、このトレイが次々と各反応器を巡回するので、これによるクロスコンタミは避けられない。これを避ける構造にすれば、さらに変換効率の向上に貢献したであろうと思われる。

その後、同研究室では高周波に変わって低圧水銀ランプを設置し、紫外線による光CVDもトライされた。そして素晴しい数々の成果を出され、アモルファス太陽電池の発展に大きく貢献された。さらに、東工大からの評判や口コミで、大阪大学の浜川研究室、日立中央研究所、富士電機、電電公社、富士写真フィルム、松下電器等々、当時国内におけるアモルファスシリコン太陽電池開発の草分け的研究機関で採用していただいた。皆様数々の成果を出され、アモルファス太陽電池の発展に大きく貢献された。本装置の開発者の一人として、この上なく喜ばしいことと思っている。

開発秘話：スパッタ成膜中の欠陥低減(材料メーカーのアプローチ)

日鉱金属株式会社 執行役員 電子材料カンパニー 技術部長　大橋 建夫

半導体プロセスにおいて、ウェーハ収率の向上のためパーティクル（ダスト）を減らすという戦いが、デバイスの集積密度の向上とともに絶えることなく続けられてきた。

当社は、スパッタのターゲットの開発・販売をしているが、お客様からの要望も、パーティクルの少ないものをというものが多く寄せられてきた。

ターゲット素材の密度向上や結晶組織の微細化・配向性の制御等のターゲット自体改良に加え、ターゲットに付着した膜の剥れを防止するためのターゲットの角をR加工へ変更するなどの変更や、デポ膜が付く部分をサンドブラストで粗化してデポ膜が剥れにくくする対策をとっている。ターゲット以外のシールド等のチャンバー内パーツ（図1）にも、ブラスト処理やアルミ溶射等による表面粗化によるデポ膜剥離対策が施され現在に至っている。このようなパーツ類の表面粗化の一つとして当社が開発したPG（パーティクルゲッター（図2にパーツ装着例を示す））があり、この開発経緯を振り返ってみたい。

今から20年近く前、当社が半導体用のターゲットに参入して数年ほど経過したころ、当時もスパッタ中にウェーハ上のパーティクルの低減が重要課題となっていた。

ある顧客を訪問した際に、その顧客から、シールドからの剥離防止のためにパーツ表面を粗化することを紹介していただいた。一方、そのころ当社の別部門の主力製品であった電解銅箔の表面を観察する機会があり、電解箔の樹状突起（デンドライト）による表面（図3）の凹凸が大きく、かつ入り組んでいるため、デポ膜が剥離れにくいのではと考えた。しかしながら、電解銅箔そのままでは真空中での揮発成分が多く使えない。

表面形状を保持したままで揮発成分を除く試行錯誤の末に製品化に至った。この特殊銅箔を使った剥離防止板を、パーティクル（Particle）を取り除く（Getter）という意味でPGと名付けた。

電解銅箔を使う方針は決まったものの、開発に取りかかると次から次へと課題が持ち上がった。まずは銅箔を試験的にスパッタ装置に装着し、膜を固着できるか試験を行った。PGにデポ膜が堆積してくると、付着した膜内の圧縮応力のためにPGに膨れが生じ、さらに、膜厚が増加すると銅箔内に発生する引張応力のためにPGがちぎれるという現象が起きた。これには箔を波型にして変形を吸収することを考えた。

当初単純な波型の蛇腹を検討したが、蛇腹の谷に沿った方向の変形が吸収できないために、箔のちぎれは収まらなかった。そこでX-Y両方向に山と谷を持たせたエンボス面を検討した。開発時は、人が丁寧に折って作製したエンボス加工したPGにデポ膜の付着試験を行ったところ、非常に良好であった。これを量産するためのエンボス加工方法を検討した。はじめに、版画をヒントに、片面にピラミッド型の山を縦横に並べたエンボス状に加工した型を置き、もう片側から銅箔を押し付けて型をとるラバープレスと呼ばれる方法を採用したが、さらなる量産性を求めて、エンボス面の雄型と雌型の型を組み合わせた1組のロール間に銅箔を通して、エンボス加工法としている。このように、エンボス加工したPGをスポット溶接したもので、条件によっては1mm程度のデポ膜がついた状態でもPG膜の地切れを起こすことなく保持できるまでになった。

次に、チャンバー内の部品にいかに取り付けるかの検討に入った。当初はビス止め、次いでリベット止めを行っていたが、ビスやリベットの頭の部分からの剥離が起こった。頭の部分PGで覆うことも検討したが、もともとスパッタ装置内はこのような装着を想定していないことから、クリアランスが狭く、ビスだけでもかなりの空間を取る上に、PGを被せられる場所は非常に限定されてしまった。

そこでスポット溶接を検討した。当初、Cu製の溶接棒を試したが、PG自体もCu製のために溶接できなかったため、新たな溶接棒を検討した。さまざまな溶接棒を検討した結果、Cuの母材料の先端にWの細い棒を埋め込んだ溶接棒で溶接可能であることが分かった。しかしながら、アルミ合金製のパーツに溶接

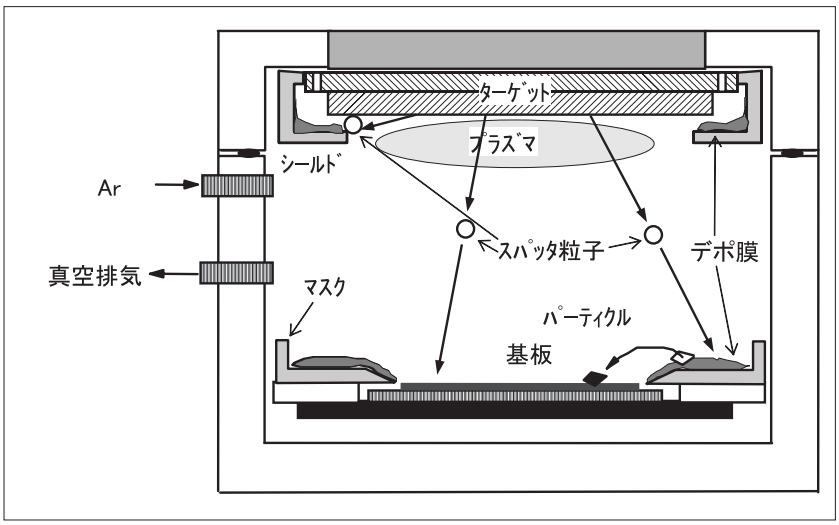


図1　スパッタ装置内でのデポ膜の形成

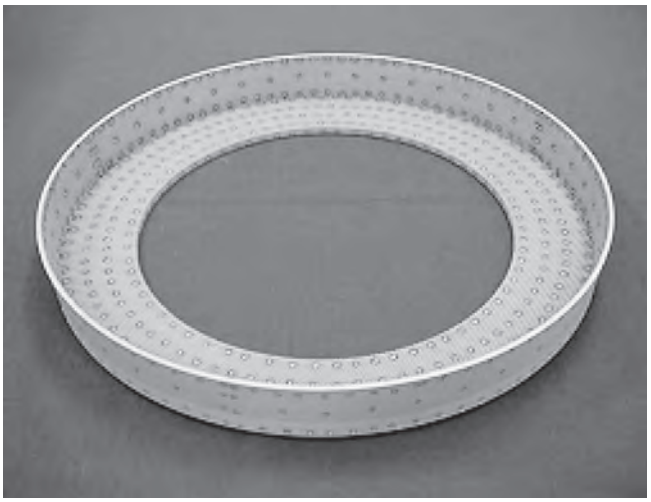


図2 PGを装着したパーツの例（内側にPGを装着）



図3 電解銅箔表面SEM像

するには、それでも溶接できなかったため、溶接機メーカーの協力のもと、何とか条件を見つけ出しクリアすることができた。また、PGを装着する間隔の最適化もなされた。チャンバーやそのパーツの位置によって、薄く付くところやクリアランスが充分取れる部分ではデポ膜が付着したPGの膨れの許容範囲が大きいため、比較的溶接間隔を広くすることが可能であるが、デポ膜が厚く付くところは溶接間隔を狭くしてパーツからのPGの膨れを抑えるが、間隔を小さくしすぎるとスポット溶接時に溶接済みの部分に電流が流れてしまい（分流効果）溶接できなくなるため、スポット溶接時の最小間隔が決められた。

PGの用途が広がってくると、デポ膜が厚い部分だけでなく、薄い部分やクリアランスの小さい部分への適用の検討を始めた。その方策として、一つは従来の210μmの箔より薄い70μmの箔を用い始めた。さらに、エンボス加工による凹凸を少なくするために、2回場所をずらしてエンボスの型押しを行うマルチエンボス加工の適用も始めた。このマルチエンボス加工は、後に膜剥れの防止にも有効であることが判ったため、厚箔にも適用することとなった。また、現在は140μmの箔もラインアップに加え、取付け位置・用途による最適化に対応している。

PGの生産量が増えていくにつれて、機械化の導入も検討した。一つはPGのパーツへの溶接作業の自動化を試みた。ロボットアームに溶接棒をセットし、溶接作業の自動化を試みたが、さまざまの形状・大きさのパーツの固定・位置決めがうまくできなかったため、断念したこともあった。一方、それまでPG取り付けるパーツ形状ごとの切断を作業者が金きりバサミで行っていたものを、レーザー切断機に置き換えたのは、機械化に成功した例である。このレーザー切断によって、形状が安定するとともに切断工程のスピードアップにつながった。

また図2に示すパーツのように凹凸のある面は、PGに切込みを入れたり、数枚PGを組み合わせたりして取り付けていたが、より効率的にPGを取り付けるため、PGを取り付けるパーツ面の金型を作製してそこにPGをおき、それを厚さ数cmのゴムを挟んでプレス機で押すことで、平板のPGに三次元のプロファイルを持たせて、それを溶接でとめている。

こうして始まったPGの用途は、半導体用スパッタ装置であったが、液晶やプラズマディスプレイ用にも拡大している。元々当社は、半導体用ターゲットに加えFDP用のITO（インジウムと錫の酸化物）ターゲットを製造している。以前半導体ターゲットを使っていただいた方がFPDに移り、ITOの成膜プロセスにおけるパーティクル低減を考えた際に当社に声をかけていただいたのがきっかけに、量産ラインでの展開に至っている。

一方、現在半導体用の最新ラインのスパッタチャンバーでは、設計段階で膜剥れ対策がとられているため、PGが使われることはなくなってきた。PGを通じた先端プロセスの情報収集の機能は薄れてきたこともあり、現在当社はPG箔の供給に専念し、PGの取付けは外部に技術移転している。

これまで開発経緯を振り返ってみると、PGは他部署との情報交換、今で言うシナジー効果とまったく別分野からのアイディアにより完成した製品である。当部門にとって、本来取り扱っていたスパッタリングターゲットと分野は共通なものの、製品はまったく異なるものであった。

また、顧客で使っていただき始めた時期に、同じ県内のある顧客のもとへ2週間ごとにPGを装着したパーツを届け、その帰りに使用済みパーツを引き取ることを行っていた。その際、毎回責任者の方と話をする機会があり、さまざまなアドバイスをいただいた。2週間ごとにいただくアドバイスとそれへの対応で、PG自体の改良を飛躍的に進めることができた。

PGような新規分野の製品の開発は、一つの目的を明確にしたあとは、さまざまな知識、情報、思いつきを集めたうえでさまざまなトライをして、顧客の要望に素早く応えていくことで、ようやく物になっていったと感じている。

開発秘話：分析業務における短納期の実現

株式会社住化分析センター　長谷川 幹男

1. はじめに

当社、住化分析センターは、昭和47年に創立以来、本年で創立35年を迎えました。発足当初の環境分析事業から現在の環境調査・測定、エレクトロニクス、危険性調査、食品分野・微生物試験、医薬品・バイオ、科学・工業用製品・原材料、化学物質の登録申請・安全性調査、機器・付属品販売等の綜合分析・評価会社として、この間幾多の苦難はありましたが各企業の方々からのご愛顧のお陰で、業容は概ね順調に拡大基調で推移してまいりました。この場をお借りしまして御礼申し上げます。

当社（Sumika Chemical Analysis Service: SCAS）は、ゆるぎないお客さまとのパートナーシップを目指して、Speedy、Cost-conscious、Accurate、Serviceを行動基準としております。そのひとつのSpeedyは、納期を大幅に短縮し、約束した期日の厳守を目指しています。お客さまからのご依頼は、工程管理、開発研究、トラブル対策、監視等いろいろな目的がありますが、ご依頼を決断された時点から、結果を少しでも早く知りたい、結果によって次のアクションの要否、方法、スケジュールを早く決定したい等、納期には非常に高い関心を持っています。したがって、受託分析事業においては、納期管理はもとより、納期短縮は最重要な戦略のひとつであります。

我々の職場では電子産業分野を対象とした分析を主な業務としていますが、この短納期化の構築は、特に電子産業分野向けにおいては重要な課題です。本題の開発秘話には若干趣を異にしますが、短納期システム構築例の一端として、電子材料表面清浄度評価としての金属元素分析報告即納化の実現例をご紹介いたします。

2. ご依頼からご報告まで

お客さまからのお問い合わせについては、先ず営業部門が担当し、その内容は営業部門担当者から電話なり電子メールで分析ラボに伝わります。技術的判断、実施可否、納期等を検討して、最終的に当社ネットワークの受注・分析管理システムに、分析項目、料金、試料受領予定日、納期等が契約内容として登録されます。分析試料が届くと計画に従って分析がスタートされ、着手日、担当者、完了予定日、完了日等がその都度ネットワークへ入力されて、進捗管理システムを通じて納期管理されます。

お客さまへの報告の納期は、分析内容によっていろいろ異なりますが、通常納期は1週間程度としています。ただ短納期をご要望された場合は、分析装置・設備・器具の確保、試薬準備等を考慮して、3日程度で緊急対応処理しています。当職場では、冒頭に記述した通り、電子材料表面清浄度評価分析を即納システム化しており（午前中に届いた試料は当日中に分析結果を速報）、これが当社の分析技術力とともに顧客から大きな信頼を得ています。

3. 分析業務の細分化と標準化

業務の分業化は、DIPS（Double Intellectual People System）に関する図書等に紹介されている通り、3つのS要素（Simplification: 単純化、Standardization: 標準化、Specialization: 専門化）に大きな効果があると言われています。そして、生産性向上は分業と3Sからとも言われています。また、整理、整頓、清掃の3Sは、安全管理、品質管理の上でも重要でどの企業でも実施していますが、この3Sを加えた3S+3Sでさらに生産性向上の効果が上がります。

ラボにおける分析業務を分業化するにあたり、まず業務の細分化とその効果をもう少し具体的に下記に述べてみます。

分析業務をプロセス順にみると、試料内容により差異はあるものの、①サンプリング→②分解・溶液化→③精製・濃縮→④測定→⑤データ解析→⑥報告書作成の6つのプロセスに分類することができます。その中で、①から⑤までの各プロセスに対する処理方法は一種類だけではなく、通常何種類かの方法があります。たとえば、②の分解・溶液化の方法において、酸を使用する場合でも、塩酸、硝酸、硫酸、フッ酸、王水、その他各種混酸等と多種の酸を使う方法があります。④の測定においては、ICP/MS（ICP質量分析法）、ICP/AES（ICP発光分析法）、AAS（原子吸光法）、GC/MS（ガスクロマトグラフ質量分析法）、イオンクロマトグラフ法等、多くの方法があります。データ解析方法においても、何通りかの方法が考えられます。

上記5つのプロセスでそれぞれ5通りの方法があると仮定した場合、その分析方法は5^5＝3,125通りの方法が存在することになります。したがって、ある分析を実施する場合に、非常に多くの方法の中から1つの方法を選定しなければなりません。そのためには3,125個のマニュアル作成が必要になりますが、これは非現実的です。しかし、各プロセスの業務・作業を独立したものとして細分化して考えると、各プロセスの作業方法は5通りになり、5×5通り＝25通りの方法となります。非常に簡素化されて、分析マニュアルも25個の作成でよく、分析標準化が大変容易となります。このように、業務を単位作業で捉えれば、大部分が標準化された既存の分析方法で対応できることになります。

しかし、分業については長所、短所も考えられ、特に分析業務の分業化はその業務量、分析技術者数等の一定条件が整う必要があって、多くのラボでは実施していません。方法は理解してい

てもなかなか実行できないのが実情です。

4. 分析業務の分業化と実現

一般的には、受注案件ごとに熟練した分析者が最初から最後まで受け持って分析します。この一案件一担当者システムは分析者のプロ意識を満足し、受注数量、分析者数が少ない場合には大きな弊害がなく、むしろよい方法といえます。我々の職場でもこの一案件一担当者システムで処理していましたが、受注数量の増加、それに伴う分析者数の増加により、共用の設備、分析装置等の使用時間帯が重複することがしばしばみられるようになりました。

この問題・状況を、従来から日常的に行っていたチームミーティングの場で話題に取り上げ、装置の使用の順番待ち、分析装置による検量線作成の使用者毎重複作成等、非効率的状況をチーム全員で認識しました。測定を専任化すればこれらの重複問題は回避できるのではという対策案でまとまりましたが、反面、このような分業は分析者が一歯車的存在になるのではという、特に分析熟練者のプライド意識の問題がありました。改革には当然功罪が伴いますが、分業化のメリットを考え、現実の重複問題解消にはぜひ取り入れる必要があることをチームリーダーの強い方針と全員の合意で決意し、取り入れることになりました。分業の中には、受付・外部対応も専任化することにし、これにより、分析担当者の受注案件に関する多くの電話、メール等での問合せの対応による分析作業の中断が回避できます。受付～報告までを4作業に分類して分業化することとしました。

5. 分析業務のローテーションと平準化

業務の分業化は3項に記述したSimplification: 単純化、Standardization: 標準化、Specialization: 専門化の効果がありました。マニュアルは完備され、各プロセス担当者はその業務について専門化し、習熟し、知識・技術も専門的に深化、高度化して一定の成果が現れました。反面、プロセス担当者を固定化するとそれぞれの業務繁忙度のばらつき、担当者自身の技術の多能化欲望等に対する問題の発生を経験し、必ずしも満足できる体制とはいえませんでした。この問題についても、チーム員全員で現状の問題、対策方法を議論した結果、分業化した各業務をそれぞれがローテーションするという案を採用することにしました。各プロセスの配置を一定期間ごとにローテーションし、これを繰り返して全員が全プロセス技術を習得できるような運営体制に見直しました。各人の技術修得欲望を満たし多能化が図られ、繁忙プロセスへの相互補完も容易となりました。このような業務の平準化は、各人の休暇取得も容易になるなど側面的な効果もありました。

この体制を構築するには、チームワーク、分析者自ら業務改革を行うという強い前向きな意識が必要で、今まで当たり前に行ってきた作業方法をもっと効率的にできないか、簡素にできないかという、自ら見直す分析者個々の士気、職場全体の活性とチームワークが最大のポイントであったと考えています。分析の効率化、スピードアップを検討すれば、どの職場でも思いつく方法ではあっても、あるいは知ってはいても、実際に効果的に実現できているところは少ないといえます。分析以外のスポーツなどあらゆる場面で共通ですが、“やり方が分かっている”と“実行できている”には大きな隔たりがあります。

6. 短納期化を目指した分析プロセスの改革

短納期を目指した最も基本的な部分は、前述した業務の分業化、平準化とこれに対応した分析技術者の的確な配置でした。これをさらに進めて、分析試料受領当日に速報が可能な短納期化を目指しました。分析技術そのものの分析所要時間の大幅短縮は、分析技術の根本的な開発が必要で容易ではありません。そこで、その分析業務プロセスに関し、各プロセスの徹底的効率化を図るとともに、それぞれが活かされるようにシステム化を図りました。

効率化については、受付、試薬・装置準備、分析ローテーションの最適化、装置機能の有効活用、データ解析方法の効率化、報告書作成方法の効率化、etc.と徹底して各プロセスを見直しました。これらは、分析受注管理方法の改善、作業予定表の改善、試料容器の改良、容器識別方法の改善、分析治具の考案、試料溶解方法の改善、分析正確度改善、分析データ解析方法の改善、分析済み試料返却方法の改善、etc.と非常に多くの改善策として提案され、大部分が実行に移されています。

効率化、平準化は、生産性向上、納期短縮に大きな効果として成果が現れました。これをチーム全員の合意の下で確実に運用するため、それぞれをシステム化しました。このシステムが現在うまく機能して、分析データの短納期体制が実現しています。

7. おわりに

分析データの短納期化は、ひとつだけの対策だけで成立する決定打はありません。プロセス全体にわたっての地道な細部の効率化追求が必要です。それぞれ一つひとつの効率化は小さくても、それをプロセス全体として効果的に運営できるシステム化が大幅な納期短縮に繋がります。この短納期化の実現は、初期にチームメンバーの分業化抵抗意識がありましたが、方針決定後は全員の協力意識、そして実行力が日常の中で培われていたことが大きな要因でした。その成果は見える形で分析技術者に示すことが大切です。達成感、やりがいを感じながら、継続した活力、追及体質が醸成されます。そのベースは、各分析技術者の“本気、やる気、元気”な集合した力強い現場力であったといえます。

開発秘話：電熱式半導体プロセス排ガス除害装置開発の歴史

カンケンテクノ株式会社 代表取締役社長　今村 啓志

はじめに

産業革命以降、限りある化石燃料を使用して、わずか百数十年の間にこれほどまでに大気を汚染させようとは誰が予測したでしょうか？

弊社は来年で創立30周年を迎えますが、大気汚染防止対策・環境清浄化を掲げ、電熱炉を活用した大気公害処理（VOC、NOX）、廃水処理等プラント技術に関する経験とノウハウを結集し、特に約10年前から半導体プロセス排ガス専用の除害装置分野に進出した除害装置専業メーカーであります。

弊社本社工場は地球温暖化防止を京都議定書という形で世界に発信した京都に位置していることも何らかの因縁があるのかもしれませんが、この議定書で削減を義務付けられた半導体製造プロセスで大量に使用されるフッ素を含んだPFCガスを、電熱ヒータ式電気炉と水スクラバーを一体化させた除害装置で処理できる優れた装置であるという評価をいただいております。さて、話は変わりますが、今まではこのような環境が重要視されつつある世の中の流れに引っ張られ、また幸運にも助けられて、我々の装置がお客様に受け入れられてきたと思います。今後は、世界の中で日本は、いや環境はどうなっていくのかを考えねばなりません。弊社はビジョンにも取り入れていますように、「皆様とともに持続可能な社会と環境に向かって」力を結集させていきます。すなわち、あらゆる環境問題に対して真正面から真摯に受け止め、技術指向で解決策を提供し、お互いにとって新しいWin-Winの関係を築いていきたいと願っています。

Win-Winの関係を実現できる具体的な商品は何なのか、弊社の技術に関して以下説明させていただきます。もともと環境問題に取り組み、燃焼炉等設計・製造に長く携わり、燃焼方式の長所・短所は充分に理解しておりましたので、この経験と技術をもとに電熱方式に特化した除害装置KTシリーズを開発し、市場にご提供してまいりました。

1. KT1000シリーズの特徴

図1にKT1000シリーズに共通する半導体プロセス排ガス処理フローを示します。

①入口スクラバーでは排ガスのダスト粉塵を除去するとともに、加水分解性物質を処理し、反応塔でのPFC等分解反応用水分を補給します。

②反応塔では、表1に示された反応塔温度で、熱（酸化）分解反応によりSiH4をTLV（許容濃度）以下に除害するとともに、PFCと水の除害反応、F2等ハロゲン系ガスと水の反応による可溶成水素化物（HF等）生成反応を促進させます。

③出口スクラバーでは、反応塔で生成したHF等反応生成物を洗浄除去するとともに、清浄排気ガスを冷却し後工程の負荷を低減します。

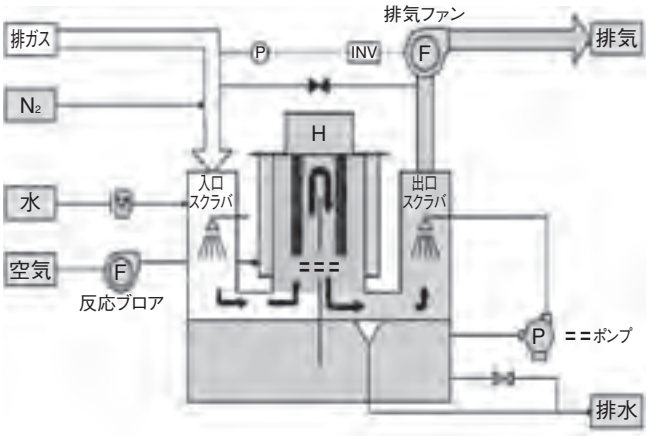
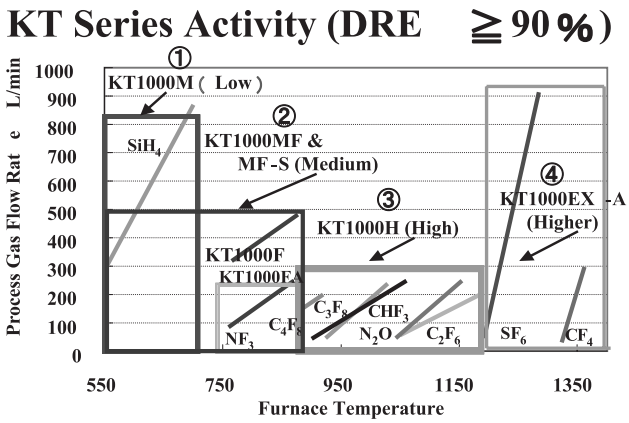


図1　KT1000シリーズ除害装置のフローシート

以上述べた入口スクラバー、反応塔、出口スクラバーの有機的結合により、低消費エネルギーで高効率な除害処理を可能にし、本処理方法は日米両国の特許を取得しており、差別化することができております。

なお、排気ファンのインバータ制御は、入口静圧を安定させ、負荷変動や機内静圧変動に対処できるため、上流プロセスへの擾乱（じょうらん）を抑えることが可能です。以上の機能のすべてを950～1,100mm角のフットプリントにまとめています。KTシリーズで除害できるガスと処理風量の分類は表1をご参照ください。

表1　KTシリーズ分類（2007年12月現在）



2. 燃焼方式除害との違い

除害装置KTシリーズの特徴は、電熱ヒータによる電熱炉と水スクラバーのコンビネーションにあります。これと対照的な除害方式に燃焼方式除害装置があることはよく知られていますが、その違いに関してはあまりよく認識されてはいないのではと感じられますので、以下その違いについて述べさせていただきます。

燃焼方式除害装置の出発点も、SiH_4の燃焼除害にあったといってよいと思います。ただ、SiH_4と酸素の燃焼反応は発熱反応であり、シランと空気と着火源のセットで処理をしましたが、除害対象ガスにPFCが加わったことにより、様相は大きく変化せざるを得なくなりました。すなわち、大量の燃料ガスと空気、ないしは酸素を導入し、発熱反応を先行させることが不可欠の条件となりました。このため、処理しようとする半導体プロセスガスの総量に比べ、大きく膨張した排気ガスを生成してしまうのが燃焼除害装置であるといえます。排出ガスとしての基準値を満たした排ガスとはいえ、排出される腐食性ガス総量は電熱方式の除害装置KTに比べ非常に大きくなってしまう。また、F_2、Cl_2といったハロゲン系ガスの除害も、燃焼方式では難しい。これらの難点をクリアする除害方式が、電熱炉と水スクラバーの融合による弊社除害装置KTシリーズといえます。

3. 温暖化防止への取組み

エッチングプロセスに使用されているCF_4やLCDプロセスのSF_6などは、高温による分解が必要であり、長年この問題に取り組んでまいりました。ややもすると、燃焼すれば簡単に処理できるのではないか？と自問自答しながら試行錯誤の毎日でありました。しかしながら、燃焼処理するためには高温に上げなければ不可能です。

二次副生成物のNOXや未反応ガス、大量の水分が出ることは必然であり、水分とともにHF、F_2等が排出されます。この問題を解決するには、炉内滞留時間を長くする（塔内通過スピード遅くする）ことが必要であります。それには装置を巨大化するしかありません。大きな装置、大量の燃料消費、それゆえにヒーター方式にカンケンの運命を託し、決意新たにヒーターの開発と高温に耐えうるコンパクトな装置の製作にとりかかり、数年の時を経て現在、KT1000EX（100L/min）、そして大容量タイプKT1000EXA（CF4＝300L、SF6＝1000L）を市場に送り出すことができました。

この10数年の歩みは、ヒーター開発、腐食対策、粉塵処理との闘いであったといっても過言ではありません。半導体製造プロセスでのすべての設備に提供可能な装置をラインアップすることができました。

4. KT1000シリーズ ラインアップ

CVD、エッチャーの種類ごとに選択できるように表2を添付しました。表2の「KT1000シリーズ」で、半導体製造業界の技術の変化に合わせ、より一層進化を続けてまいります。

10年前市場に提供したものは、減圧、常圧CVD成膜用SiH_4専用除害装置KT1000Mであり、これに続いて、1997年にはプラズマCVDクリーニングガスNF_3を同時除害するKT1000Fを、2000年にはC_2F_6等クリーニング用PFC（パーフルオロカーボン）を成膜用SiH_4除害と同じ装置で除害するKT1000H、2002年には微細加工用エッチングプロセスで使用されるSF_6、CF_4を除害可能な

表2 「KT1000」機種選定表

半導体製造装置	デポジットガス種	クリーニングガス種	KT1000機種
AP-CVD	SiH_4、PH_3、B_2H_6	なし	KT1000M
LP-CVD	TEOS、TEB、TEPO	ClF_3、NF_3、COF_2	KT1000F、1000MFシリーズ
PE-CVD HDP-CVD SA-CVD	NH_3、N_2O WF_6など	C_2F_6、C_3F_8、C_4F_8、F_2	KT1000H
Etcher	CF_4、SF_6、HBr、BCl_3、HI、Cl_2、HClなど		KT1000EX、EXAシリーズ

KT1000EXを製品化しました。これにより、PFC対策のために電気ヒーター方式を用いて1,400℃という高温領域まで応用可能な製品の実用化が実現しました。これら一連の開発の流れと並行して、ヒーター式除害がPFC除害の方式として最新版IPCCガイドラインで正式に認定されました。その理由として、今までヒーター式では不可能とされてきましたPFCの中で最も分解温度が高いCF_4除害を、独自ヒーターの開発により弊社が可能にしたことが考慮されたのは間違いないでしょう。

5. 今後の取組み



図2 CVD系プロセス排ガス除害装置 KT1000MF

ややもすれば大企業では、組織の巨大化による迅速な対応の遅れやCSRの隠蔽問題が取り上げられていますが、そういう中で「カンケンにしかできないものは何か」。中小企業の意志決定の速さを活かした対応のスピーディー化と原理原則に基づいた理論的な考察ではないでしょうか。泥臭いが、現場での実験・実証が命であり、硬直化された大きな組織よりも、管理者が少なくプレーイングマネージャーによるプロジェクト運営が求められているのではないかとも考えています。一人ひとりのスキルアップとプレーイングマネージメントを向上させながら、冒頭でも述べましたが、環境は国境を越えてと言われる中で、グローバルな視点で弊社のビジョンに沿ってお客様とWin-Winの関係を築いていきたいと考えています。

最後になりますが、2007年末で累計3,000台を超える台数を出荷（300mm対応除害装置としても400機を出荷）する除害装置トップメーカーとして多くのユーザーから支持されるまでになりましたが、これに甘えることなくニーズを的確に捉え、より良い製品を送り出し続けるよう全力を傾注していきたいと考えています。ご指導、ご鞭撻よろしくお願いいたします。

開発秘話：全反射蛍光X線分析装置の開発

株式会社テクノス 研究開発部　西萩 一夫

現在の半導体製造プロセスにおいて、歩留り向上を図るためには、パーティクルの減少とともに、金属汚染の減少は不可欠である。金属汚染としては、ウェーハ、プロセス、製造装置あるいはユーティリティー起因などが考えられるが、その測定方法としては、ICP-MSなどの化学分析、SIMSなどの物理分析などがある。化学分析では、超純水や薬液のように簡単な前処理で分析できる場合を除き、ウェーハを直接分析はできない。物理分析では、ミクロンオーダの局所的な分析はできるが、ウェーハ全面あるいは局所を高感度（10の10乗台atoms/cm_2、単位は以下同じ）で分析する手法は、1980年代では未だ登場していなかった。ウェーハ上での金属汚染を非破壊、非接触、高感度で分析する手法が待ち望まれた。

当社（テクノス）はX線分析装置のメーカーとして、1987年大阪で産声を上げた。最初の2年で、全反射蛍光X線分析装置、EXAFS（Extended X-Ray Absorption Fine Structure）、2結晶蛍光X線分析装置、画像マッピング装置などを製作した。

全反射蛍光X線分析は、蛍光X線分析の一種である。蛍光X線分析装置は、鉄鋼、非鉄金属、セメントなどの工業原料などを加圧成型後、測定するものである。一方全反射蛍光X線分析装置は、微少量試料の分析に威力を発揮する。

全反射蛍光X線分析法は、実は日本が初めてその応用を世界に問ったもので、1971年に九州大学の米田先生、堀内先生が提唱されたものである。その後、各種アプリケーション例が発表され、表面分析法の一種としてISO化された（ISO TC201 WG-2委員会で検討され、ISO 14706、ISO 17331などがすでに発行されている）。

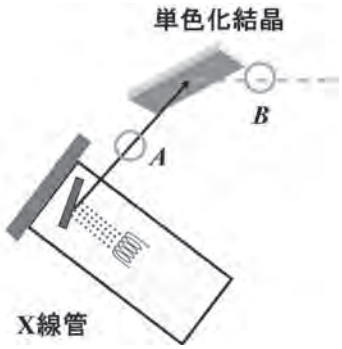
我々が、全反射蛍光X線分析装置を製作し始めたころ、海外でしか実績がなく（主に環境分析）アプリケーションを捜し求めた。当初、微少量試料ということで兵庫県警の科捜研と共同開発などを行ったが、民間向けにそこそこの台数が見込めるアプリケーションを探していた。当初は、微少量試料を、表面が清浄で鏡面の支持体の上において分析を行っていた。しかし、支持体は鏡面でも試料自体は鏡面でないため、バックグラウンドが高く、良いS/Nでの分析は困難であった。そこで、試料自身が鏡面であれば高いS/N分析できると考え、各種試料を試してみた。最初に磁気ディスクのメディアに注目した。しかし測定対象が主成分分析であり、微量でないこと、高精度分析が必要なことから断念した。次に出会ったのがシリコンウェーハであった。

当時（1989年）デバイス製造に当たって、プロセスあるいはウェーハ自身の金属汚染が耐圧不良や接合リークなどを引き起こし、歩留りを下げていた。特に10の10乗台以上の遷移金属（特にFe、Cuなど）がその張本人であった。

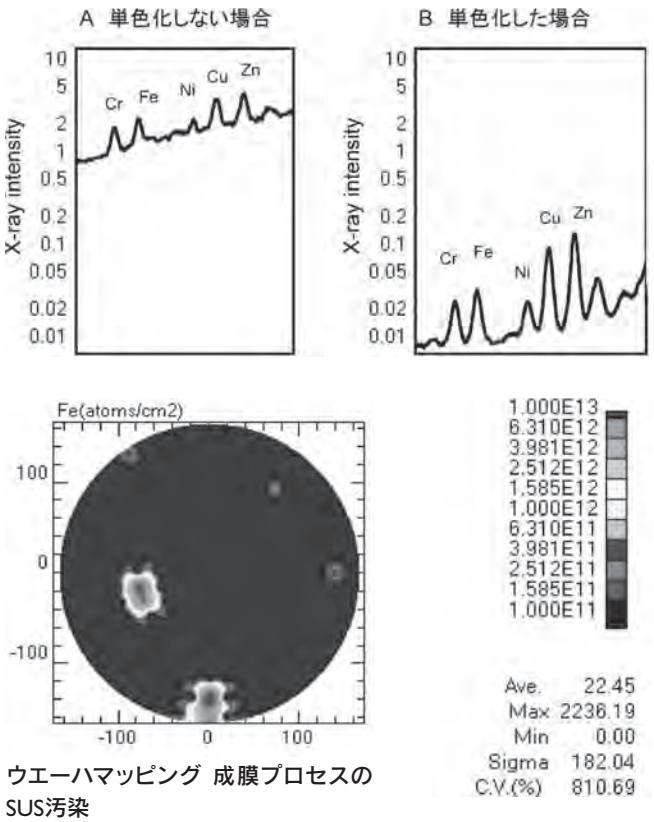
全反射蛍光X線分析装置にとっては、シリコンウェーハの分析はまたとない分析対象であった。表面は鏡面であり、分析対象は微量の遷移金属であり、バルクではなく表面分析であった。また、遷移金属というのは、蛍光X線分析では特に得意とする高感度分析可能な元素であった。

さっそく環境用の全反射蛍光X線分析装置で分析を行ったが、さすがに感度不足であった。そのときの分析感度は10の12乗程であった。この数字を見て、最初のユーザ予定者は去っていった。その半年後、東芝の半導体材料技術部（当時）の松下氏、土屋氏がその技術に目を付け、10の10乗台の感度を持つ全反射蛍光X線分析装置の開発を持ちかけた。当時の実力からすると約100倍の感度アップである。

簡単に100倍の感度アップといっても、X線強度だけをアップするとなると10,000倍の強度アップが必要であり、余程のブレークスルーがない限り不可能である。また、感度を稼ぐためにEDX（エネルギー分散蛍光X線分析法）方式を採用しているため、検出器にSSDを用いており、単純にX線強度を増加しても検出器がすぐにパンクしてしまう。そこで、X線強度は上げつつもバックグラウンドをいかに下げるかが焦点となった。まずX線強度を上げるために、X線源を封入管から回転対陰極に代えることにより、約5倍の感度アップを実現した。次にバックグラウンドを下げる方法であるが、励起方法を従来のダイレクト照射からモノクロ（単色）励起に代えた。これは全反射蛍光X線法に劇的な革命を起こした。バックグラウンドがなんと100分の1以下になったのである。



なぜバックグラウンドがかくも劇的に低下したのかを簡単に説明すると、このバックグラウンドの成分はほとんど基板のシリコンの散乱線成分であり、これをいかに取り除くかであった。全反射蛍光X線では、入射角は通常の蛍光X線と比べて非常に低く、0.05度とか0.1度しかない。通常の蛍光X線では30度とか60度である。このように非常に低角ではほとんどの入射X線は反射してしまい、ほんの一部のX線のみが試料表面（数ナノメートルから数十ナノメートル）の領域で相互作用を起こす。このように試料表面のみが分析対象で、基板の影響を受けない。言葉を代えれば、基板からの散乱線は無視できる。さらには、入射X線がX線管よりのダイレクト成分の場合、高エネルギー成分が入射すると全反射せず、試料中に入り、ほとんどが散乱成分となりバックグラウンド成分が無視できない。一方、入射X線



ウエーハマッピング 成膜プロセスの SUS汚染

をモノクロ（単色化）すると、高エネルギー成分がカットされ、さらに励起に寄与しない低エネルギー成分もカットされるため、低バックグラウンドが実現できる。

かくして、性能面では何とか当初目標感度の10の10乗台が実現できたが、思いもかけないところに伏兵がいた。それはクリーン化技術であった。当時我々は喫茶店を改装した店舗で分析装置を製作しており、その出荷先は半導体以外の業種向けであり、たとえば化学関係、環境関係であり、通常の分析室に導入されるとはいえ、半導体業界でのクリーンルームから見るとおよそゴミだらけ、コンタミだらけの世界であった。デバイスメーカーよりウェーハを借用し、測定に供したが、みるみるFe、K、Caのピークが現れ、最初はこれは高感度と感激したが、実は分析装置と装置環境雰囲気のコンタミそのものを測定しているのであった。

さらには、装置設計においてクリーン化が心配なので、当時東北大学の大見研究室におられた森田先生（現在大阪大学教授）に装置を見ていただいたが、最初は口をあんぐり開けられて、「初歩的なことがわかっていないと！」と驚かれた。最初の装置は、モータやベルトがむき出しで試料と同一雰囲気中にあり、バルブなどの使用部品も通常の市販品を使用していた。すぐに試料室と駆動室を分離したのをはじめ、ダウンフロー方式の採用など矢継ぎ早に手を打ったが、まったく異分野に乗り込み戸惑うことばかりであった。

かくして、全反射蛍光X線分析装置を世に出したが、当初デバイスメーカ数社に納入し終わったころ、突然某ウェーハメーカーの役員の方から「すぐに生産を中止してほしい」と電話があった。驚いて「何故ですか？」と問いかけたところ、「お宅のところの装置に大変迷惑している」とのことであった。よくよく確認すると、デバイスメーカでは、全反射蛍光X線分析装置をウェーハの受入れ検査に使用しており、そこでFe、Cuなどの金属コンタミが検出されると、クレーム品として受入れ拒否あるいは全ロット不良扱いされるとのことで、何とかしてほしいとのことであった。もっとも我々もどうすることもできなくてお断りすると、すぐにテクノスに来られ、デモ用の装置を見て「この装置を至急持ってきてくれ」と要望された。デモ装置を出すわけに行かず、最短で装置を仕上げ納入を行った。その会社はクリーン化に着手し、すぐに元を取ったとのことであった。

国内で数台出荷した段階で、国内より先にECS（The ElectroChemical Society）で発表した。新しい手法の発表ということで、大いに反響があり、分析会社のCharles Evans（現EAG）より、USA、EU、アジアのマーケットでの販売、サービス契約の申込みがあり、受けた。その後20年で、海外100台を含め約380台の全反射蛍光X線分析装置を販売製作した。

全反射蛍光X線分析装置は、金属汚染分析において一定の地位を占めることができた。現在も、異物検査装置とのドッキング、ウェーハ全面・高速測定、さらには前処理装置との一体型と、進化させることによりさらに発展している。また、半導体だけでなく、FPD業界や太陽電池関係でも使用され始めており、これから先も進化を続けていくであろう。



開発には、大学、産総研などからの計測やクリーン化などの基礎技術、デバイスメーカなどの現場からのニーズ、さらには、検出器や光学系などの要素技術の開発などが相俟って成功するものであり、それらの一つが欠けても成功しないことを身に沁みて感じている。全反射蛍光X線分析法の応用を世界に先駆けて発表された九州大学の米田先生（故人）、堀内先生、身近な分野での応用を検討された大阪電通代の谷口先生、高感度分析で助言をいただいた東大の合志先生、クリーン化技術でお世話になった大阪大学の森田先生に感謝。また、最初に半導体向け全反射蛍光X線分析の開発に声をかけていただいた東芝の松下さん、土屋さん、全反射蛍光X線用の標準試料作成に尽力いただいたSUMCOの藤野さん（故人）、角田さん、半導体分析のイロハを教えていただいた松下の東森さん、海外への紹介に協力いただいたChales EvansのHockett氏、各種要素部品調達で協力いただいたベンダーの皆さん、テクノスで販売、開発、生産に従事していただいた各メンバーにこの場を借りて感謝の意を表します。