半導体プロセス関連の優良企業の紹介

月刊誌「エレクトロニクス実装技術」の記事抜粋

目次

Ｐａｇｅ
先端光学系技術で発展；レ―ザーテック株式会社 ―――――――― Ｐ１
「切る・削る・磨く’」に特化；株式会社ディスコ ――――――――― Ｐ５
平坦化加工と接着技術のベンチャー、株式会社 D-process ――― Ｐ１１
高性能電子顕微鏡なら日本電子株式会社 ――――――――――― Ｐ１８

先端光学系技術で発展；レ―ザーテック株式会社

１. 会社概要

１９６０年に X 線テレビカメラを開発する有限会社として発足し、エアマイクロによる自動焦点顕微鏡の開発がヒット商品となった。１９７６年に自動焦点技術とTVカメラ技術を応用した世界初の LSI フォトマスク欠陥検査装置を開発して半導体分野に参入し、その後の業界発展を支えている。LSI マスクの位相シフト量測定装置（世界初）を始め、液晶カラーフィルターの欠陥検出・修正装置、太陽電池変換効率分布測定器など、時代が要求する測定機器をいち早く開発している。
２０１４年の売上は１３６億円、経常利益は３１．６億円で、経常利益率２３．３%、自己資本比率８０%、有利子負債ゼロという小さいながら超優良会社である。

２. 技術戦略、生産戦略

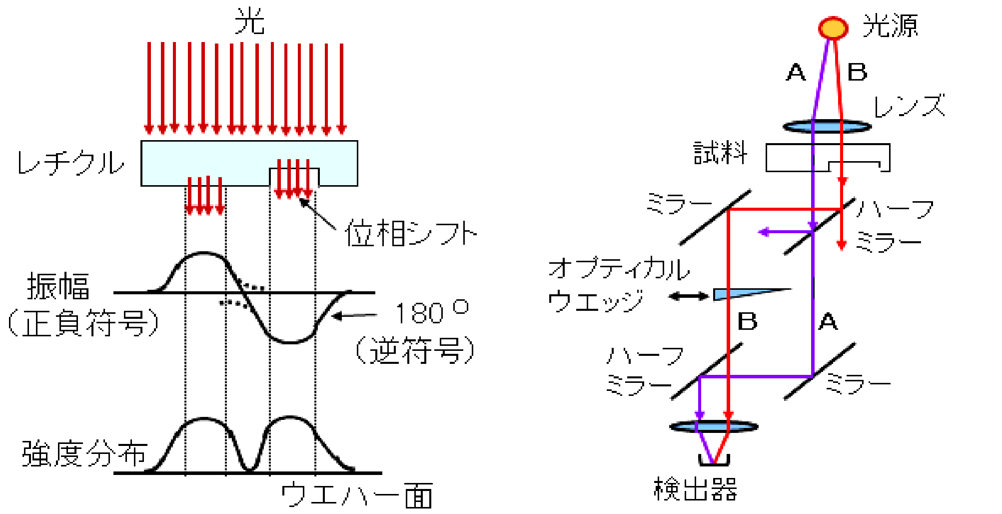
レーザーテック社の技術戦略は、「グローバルニッチトップ戦略」と称しており、ニッチ市場に特化し、技術的な差別化で高いマーケットシェアを獲得し、「規模の大を追わず」を実践して高い利益率を維持している。また顧客のニーズをいち早く把握することは、言うは易く行うは難しく、将来のビジネス動向を見通す眼力が要求される。
生産は外部委託することで設備投資を低く抑えるファブライト戦略で機動的な事業運営を行い、本社では出荷前の調整・点検を入念に行っている。従業員は２５１名でその内の６０%がエンジニアであり、売上の１０%を研究開発費として支出している技術指向の企業であり、経営資源を製品開発に集中投資し、継続的な新製品開発を可能にしている。まとめると、技術と言っても光応用技術に集中し、電子ビームやその他の

技術で他社と競争することは行わず、顧客は、半導体を中心にFPD、太陽電池、リチウム電池等に集中している。

3. 現在の主流製品は、半導体マスク欠陥検査装置

ステッパーに用いるマスクに欠陥があると、全チップが不良となってしまう。従って、マスクの欠陥検査装置は極めて重要であり、2006年に発売の MATRICS は、マスク上の欠陥や異物の検出装置として、大手半導体メーカーの最先端ラインで高く評価されている。最新装置では、最高感度20nmの検出が可能になった。また、マスクブランクス欠陥検査装置でも、業界の標準検査装置としての実績を確立している。

マスクの欠陥検査ではないが、隣り合うラインパタンのマスクの位相を反転させて解像度を上げる位相シフトマスクがLSI生産に用いられているが、その位相を調べる検査装置を世界初の商品化した。その位相シフトとその検査装置の原理を図1に示す。



位相シフトマスクの原理

石英基板の厚さを変えて入射光の位相を180° ずらすと、ウエハー上での強度分布は図のようになり、2本の線に分離する

位相差の測定原理

光源から出た2本の光は、試料の位相シフトの有る部分と無い部分を通り、図の左側のオプティカルウエッジを左右に振って位相を変化させて、2光束の干渉光強度を検出器で確認する

図1 位相シフトマスクの原理と位相差検査装置の原理

4. 早過ぎた？ EUV用ブランクス欠陥検査装置の開発

13. 5nmと超短波長の光はEUV(Extremly Ultra Violet)と呼ばれ、これを用いたステッパーは超微細加工が可能で、その開発されている。EUV用マスクブランクスの構造は、13. 5nmのMoとSiを数十層積層した構造で、EUV光の反射率が70%程度になる。欠陥は、Mo／Si層上に異物などが載っている場合は検査が容易である

が、最下層にある場合は検出が困難である。レーザーテックの検査機では、EUV光（波長13．5nm）を用いており、異物の形状や種類も分かり、実用上の問題があるかないかが調べられる。EUVステッパーの生産導入が従来の計画より大幅に遅れているので、この検査機もいつ実際の生産ラインに使われるようになるか不明である。開発が早過ぎたと言えるか、或いは間もなくブームの先取りか？　最先端の装置開発タイミングは、難しい経営判断が要求される。
EUV 露光機は、2019年から量産に使用され出して、その検査装置は世界中でレーザーテックのみが製品化しており、1台100億円などと言う噂も出るほどの人気となっている。先行投資が大きな実を結んだと言える。

5. 期待される TSV 用測定機器

TSV（Through Silicon Via；貫通電極）は、数年前から量産導入が期待されているが、イメージセンサーを除いて、一般の LSI への導入が遅れている。しかし LSI の微細化をこれ以上進めるには、技術的困難の他に膨大な費用が必要な経済的な理由から、今後の方向として微細化に代わって TSV の量産が進むとみられている。レーザーテック社は2タイプ用の検査装置を開発しており、今後大いなるビジネスが期待される。
TSVの先端にはバンプが形成されるが、数百個のバンプが正しくインターポーザなどと接続されるには、バンプの形状が均一でなければならない。レーザーテックの検査機では、バンプの横幅だけでなく、コンフォーカル顕微鏡を用いて高さも測定できる。
また、ウエハーは非常に薄く（例えば50μｍ以下）研磨されると側面がナイフエッジのようなり、チッピング（小さな欠け）などが発生し易いので、この検査も行っている。この様子を図2に示す。

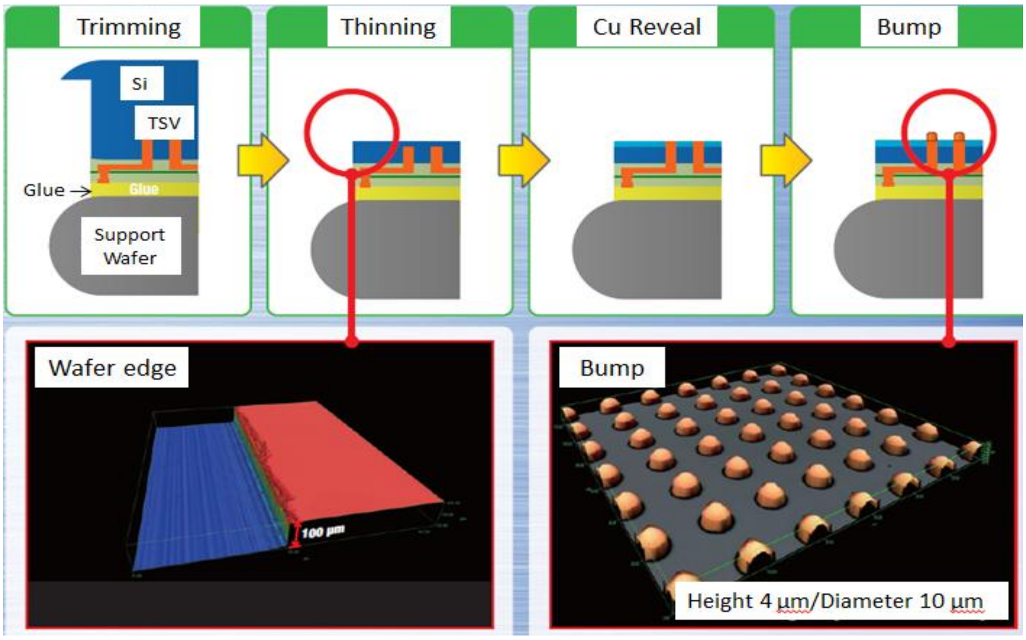


図2　バンプ検査機、ウエハー端面も検査する

6. 共焦点レーザー顕微鏡

共焦点顕微鏡は、産業界の色々な用途に使われている優れた顕微鏡であるが、その原理は図4のように簡単で、資料表面の凹凸に関わらず全ての表面にピントが合うので、非常に綺麗な画像が得られ、資料の高さの測定も可能である。レーザーテックの主要な標準製品として各界で愛用されている。

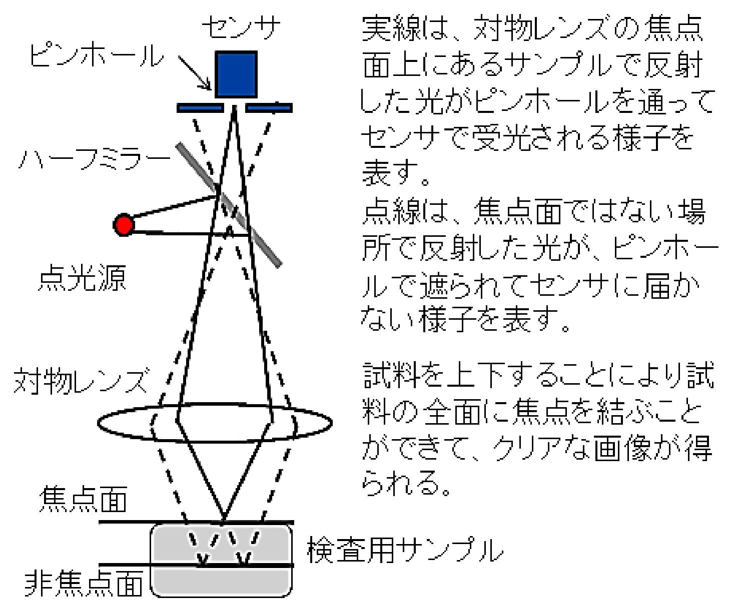


図4　共焦点顕微鏡の原理

7. その他の検査機器

リチウムイオン電池（LIB）製造用の検査機器

充放電中の化学反応の進行状況をリアルタイムのカラー動画で観察ができ、電池性能の向上や新材料開発に威力を発揮する電気化学反応可視化システムや、電極の塗布ムラなどを高速で可視化する装置 TSS20 を提供している。

太陽光発電の変換効率分布測定及び分光感度分布測定機

各種太陽電池の変換効率分布や分光感度分布を高速で可視化する装置を提供して、品質の向上や生産プロセス改善に貢献している。

8. 将来への期待

「検査できないものは改善できない」と言う言葉があるが、正しく検査し評価することによって、性能が向上し、コストが下がるのは一般に経験するところである。その点、レーザーテック社は新商品に対していち早く検査装置を開発してビジネスをサポートし業界発展に貢献されてきた。エレクトロニクス産業は今後も技術革新が続く業界だけに、先手を打った測定機器の開発に努力されることを期待したい。

「切る・削る・磨く’」に特化;株式会社ディスコ

1. 会社の概況を営業本部長に聞く

ディスコは1937年、広島県呉市に「第一製砥所」を創業したのが始まり。1950年に積算電力計の磁石にスリットを入れる厚さ1．2mmの砥石を、次いで1956年に万年筆のペン先に溝を入れる厚さ0．13mmの砥石を、更に1968年に厚さ40μmの「ミクロンカット」をそれぞれ開発し、これがディスコ社飛躍のきっかけとなった。1975年には、薄砥石の性能を活かすダイシング装置を開発し、半導体装置メーカーとなった。当時のシリコンウエハーの切断方法は、ダイアモンド針でけがいてチョコレートブレークしていたが、割り損ないの不良が多くて困っていたので、ディスコのダイシング装置は半導体メーカーにとって素晴らしい福音となった。
1977年の創立40周年を記念して「Dai Ichi Seitosho CO.,Ltd」の頭文字をとって、会社名を DISCO に変更したが、ディスコが流行る前のことだった。
2014年上期の売上は652億円で、純利益は97．6億円、経常利益率は21．1%と非常に好調で、社員数は2940名、研究費は110億円程度で売り上げの10%少々である。高品質の製品を作り、新製品のスピーディな立ち上げのため、製造は全て国内で行っており、広島工場が中心だが長野にも子会社があり、海外生産の予定はない。売上の80%が海外であり、国内は電子部品メーカーの売上が多く、半導体メーカーへの売上は少ない。
今後の注力されるテーマは、引き続きKKM（Kiru, Kezuru, Migaku）に集中し、それに必要な技術開発を怠らないこと。会社の方針として、「規模の大を追わず、社会貢献性とステークホルダーとの価値交換性を重視」している。

2. 製品化されている商品とその技術の紹介

2－1. ブレードダイシング

世界中のLSIメーカーで採用され、LSIのダイシングに必須な装置となっている。カーフ（切り代）40μmで加工する例が多いと聞いて筆者は少々驚いた。技術的にはもっと細いカーフでダイシングできるが、ユーザーが希望されて40μ mになっている。なぜなら、ダイシング部分にTEG（Test　Elemnt　Group;LSIの特性評価用の各種パターン）を入れており、機密保持のためダイシングで取り去って欲しいとのこと。
ブレード先端の形状は、図1のようにボンド層に5μm程度の大きさのダイアモンド砥粒が埋まっている構造である。通常、ウエハーによって切る長さが異なるが、トータルの加工長さで数千メートル程度は切ることができる。ブレードは硬いウエハーと衝突するので砥粒が剥離するが、下から新しい砥粒が現れて切れるようになり、これを自生発刃と呼んでいる。送り速度は100mm／sec程度で、低速になるほどダイシング形状は綺麗になる。ダイシング中は水冷を行うが、ウエハーの温度上昇を防ぐのと、ダイシングの切り屑を排出する効果がある。水冷に超純水を用いると、18MΩ の高

抵抗なので放電を起こしてウエハーが欠けることがあり、水の抵抗を下げるため炭酸ガスを含ませることがある。またSiウエハー上のAlのような金属は変色し易いので、図２のように「Stay　Clean」と言う切削水用添加剤を用いると、金属表面に膜ができて腐食を防止し、ダストの付着を防ぐ効果もある。

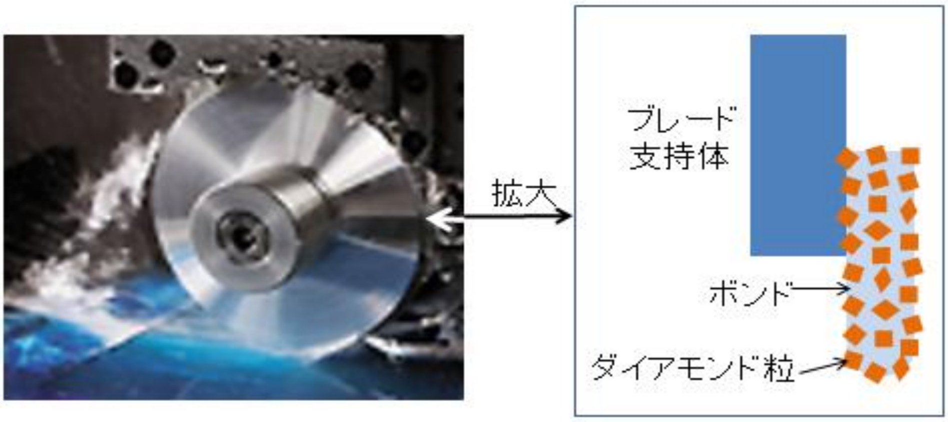


図１　ダイシングのブレードの形状

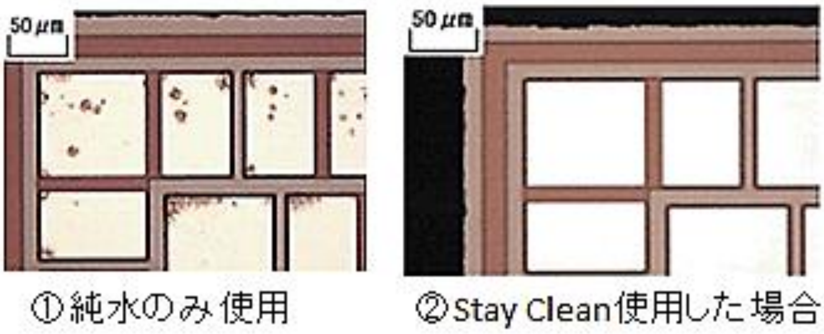


図２　切削水用添加剤による腐食防止効果

２－２. 超音波ダイシング

これまでのブレードダイシングでは切削が困難であったガラス、セラミックなどの難削材を切ると、目潰れや目詰まりの発生、チッピングやバリの増大、ブレード破損など色々な不都合が生じ易い。その解決策として超音波ダイシングを開発した。図３のように超音波でブレードを半径方向に伸縮すると、極めて短時間に砥粒が資料に大きな加速度で衝突を繰り返すことで、微細な破砕層を発生させる。ブレードと資料との間に隙間が生じることで、砥粒の冷却が行われ、目詰まりや目潰れが防止される結果、加工品質やライフが向上する。

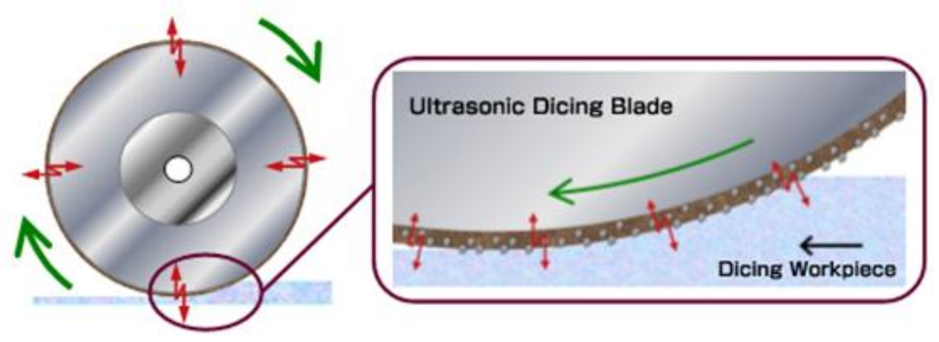


図3　超音波ダイシング加工メカニズム

2－3. レーザーステルスダイシング

レーザー光を試料内部で集光して局部的に発熱することにより改質層を形成し、チョコレートブレークやテープエキスパンドブレークでチップに分割する。例えば、シリコンウエハーの場合だと、図4の断面写真のようにウエハー内部に結晶欠陥を発生させて脆くしてブレークする。集光で発熱するためには、短波長の光だと資料表面で吸収されてしまい、長波長だとエネルギーを与えずに突き抜けてしまう。Siウエハーの場合だと1000nm程度の赤外波長が用いられる。ウエハーが反っていると集光位置がずれてしまうので、反らないようにテーブル側で真空吸着するか、テープなどで固定する。試料の表面状態によって集光が変化する（表面がAlの場合など光が反射してしまう）ので、通常は裏面から光を当てている。赤外波長のカメラで裏面から表面のパターンを検出して位置合わせを行う。ステルスダイシングの良い点は、①ストリート幅（カット幅）が狭い、②切り屑がほとんど無い、③洗浄が不要なのでMEMSなどの洗浄できないデバイスのカットに向いている、④図4のような不規則形状のチップもカットできることである。

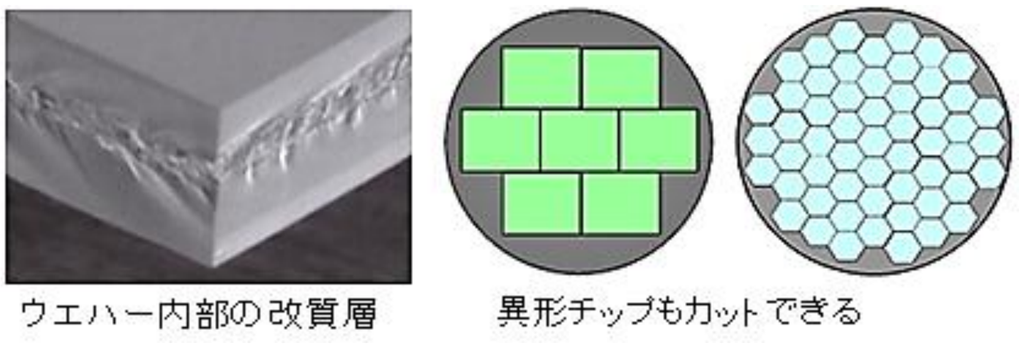


図4　ステルスダイシングのカット断面と異形状チップのイメージ

2－4. Low－k膜のグルービング
現在生産されているLSIの配線には、CR時定数を下げるため、配線金属は銅を用い、絶縁膜は誘電率の低いLow－k材料が用いられている。この銅とLow－k材がウエハー表面にあるため、通常のダイアモンドブレードでのカットが困難である。そこでレーザーにより銅とLow－k膜を除去してから、ブレードダイシングを行うのが一般的になっている。レーザー照射によるトランジスタへの熱の影響をさけるため、ショートパルスレーザーで銅とLow－k膜のみを加熱し瞬時に気化させている。図5にグル―ビングの効果を示す。

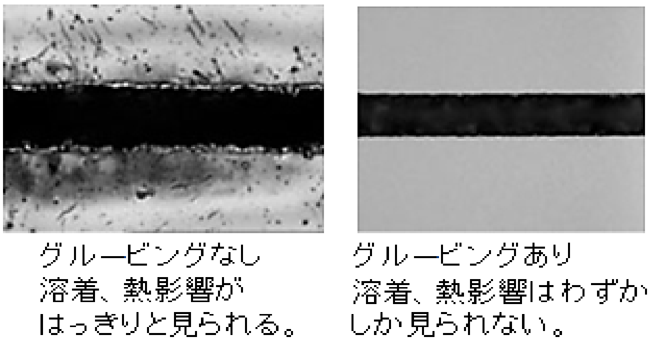


図5　Low-k 膜グルービングの効果（材料はシリコン）

2－5. 薄ウエハーの研削
LSIの微細化がそろそろ行き詰まり、今後は薄チップの多層化により集積度が上がり、機能が向上すると期待され、またスマートフォンのような薄型の機器に入れる部品は超薄型が要求されている。特にTSV（Through　Silicon　Via）では、25～50μ m厚のチップが要求されており、例えば775μmを50μ m以下まで薄くする訳で、推奨する作業手順は、①50μmの砥粒で775→100μmに研削、②5μmの砥粒で50μmに研削、③ドライポリッシュで1～2μmのダメージ層を除去する。
研削で50μ m以下に薄くすると、ウエハーの研削面にダメージが入って反りが発生し、ソーマーク除去も必要なため、研削面を鏡面状に磨き上げる必要がある。このため、水や薬液を用いないドライポリッシュを用いる。除去量0．5μmならソーマークが無くなり、1．0μmなら反りが低減し、2．0μm ならチップ強度が上昇する。図6に50μm厚まで研磨した場合の反りとドライポリッシュした後の形状を示す。

2－6. ゲッタリングについて
シリコンのLSIでは、結晶欠陥をわざわざ作って、銅や金のような金属を吸い出すゲッタリングが行われる。ドライポリッシュで完全に結晶欠陥を取り去ると裏面ゲッター層がなって困る。そこでドライポリッシュの際にキズをつける砥粒を用いて50nm程度の傷をつけてゲッタリング層としている。

（注）シリコンのトランジスタ接合の近辺に銅や金の原子が存在すると、再結合中心となって少数キャリアの移動度が減少して駆動電流が十分取れずリーク電流が増えたり特性を劣化させる。数百度に加熱すると銅や金は結晶中を動き回り、結晶内部の酸素による結晶欠陥や裏面に設けた機械的な欠陥にトラップされる、これをゲッターリングと呼んでおり、トランジスタの性能向上に不可欠な技術である。

グラインダー加工後
反り状態

ドライポリッシュ加工後
反り状態

図6　ドライポリッシュで反りが無くなる様子

2－7. 薄ウエハーのダイシング

試料が薄くなると、裏面にチッピングが発生し易くなる。これを防ぐには、ファインメッシュ砥粒のブレードを用いるのが良い。図7は、25μm厚のシリコンウエハーを、砥粒サイズ＃2000と＃4800でダイシングした時の裏面チッピングの比較を示すもので、＃4800なら非常に綺麗な断面となっている。なお、ファインメッシュのブレードでは、目詰まりを起こし易く、一定の加工負荷を維持するため自生発刃を促す必要から、送り速度やスピンドルの回転数などの加工条件を求める必要がある。また、シングルカットではなく、2種類のブレードでカットする場合もある。

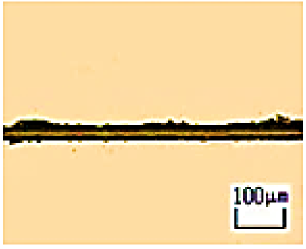


写真1：一般的な砥粒を用いたブレード (#2000)

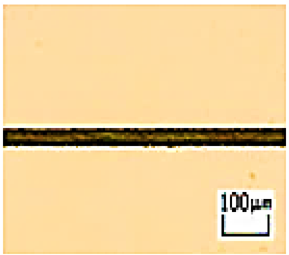


写真2：ファインメッシュ砥粒を用いたブレード (#4800)

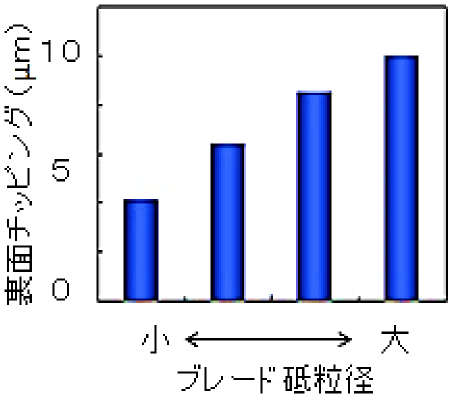


図7　25μm薄ウエハーの切断面

DBG（Dicing　Before　Grinding）

この方法は図8のように、まずウエハーの途中までダイシングを行い（ハーフカットと呼ぶ）、支持テープを貼った後、裏面研削で薄くする方法である。薄くしてからダイシングする訳ではないので、確実な方法と言える。

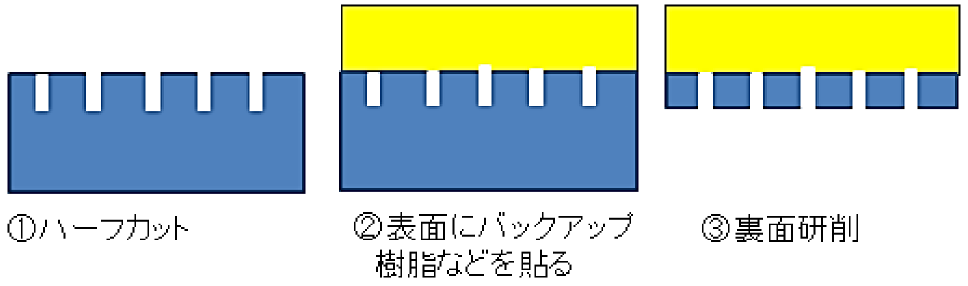


図8　DBGの作業手順

2－8. サーフェースプレーナー

延性材料（Au、Cu、はんだなど）、樹脂（フォトレジスト、ポリイミドなど）、それらの複合材料などを、ダイヤモンドバイトによって高精度平坦化するのがサーフェースプレーナである。 そのメリットとして、切削による加工のため、樹脂と金属のような複合材でも高品位に加工できる。Cu 配線と絶縁膜を一括して平坦化する場合、CMP を用いるのに比べて、スループットが向上し、スラリーを使用しないため、廃水処理のコストや環境負荷の低減も可能である。図9は、銅バンプを平坦化した写真である。原理的には簡単なプロセスであるが、用途は広がる可能性がある。

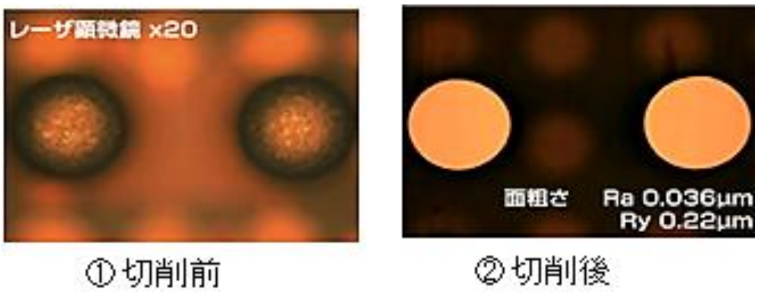


図9　サーフェースプレーナーで銅バンプ表面を平坦化

2－9. 純水リサイクル装置

ダイシングソー用超小型純水リサイクルシステムを製品化している。純水製造、ろ過、定温水供給、廃液処理など、従来個別の装置で行っていた機能を 1 台に集約し、例えば、DWR1722と言う機種なら、本機 1 台で、デュアルダイシングソーなら 2 台、シングルダイシングソーなら 4 台まで対応が可能となった。多額の設備投資が不要で、

小規模生産や一時的な増産対応の際には、柔軟に純水リサイクルシステムの構築が可能である。

3. 本社見学の様子とまとめ

以上、見てきたようにディスコ社の商品は KKM（Kiru, Kezuru, Migaku）に徹しており、ユーザーも半導体や電子部品業界の企業に絞られている。市場占有率は全世界の70%にも達しており、狭い業界とは言え圧倒的な強さを誇っている。筆者は、2000年ごろ、LSIの銅配線にCMPが導入されてブームとなった時、ディスコ社も参入するのではないかと思ったが、脇目もふらずダイシングに専念された。
こうして見ると、現在のディスコ社にウイークポイントは見当たらない。
これまで通りニッチな分野で「キラリと光る優良企業」として発展して頂きたいと思う。

平坦化加工と接着技術のベンチャー、株式会社　D-process

ベンチャー企業として成功しつつある株式会社Dーprocessを紹介する。LSI の微細化は止まるところを知らず、14nmのFinFETが量産され、10nmから7nmも話題になってきた。この微細化を支えるのがCMP（Chemical Mechanical Polish）である。CMPで平坦化することにより、短波長光の焦点ボケを防ぐことができる。CMPは、平坦化だけなく、配線やSTI（Shallow Trench Isolation）にも必須の技術として LSI の生産に多用されている。そのCMP工程の受託生産を行う目的で興されたのがDーprocessで、現社長の土肥英之氏が、わずかの資金で2003年に設立された。
一般にLSIのプロセスを扱う場合は、巨額な設備投資が必要なのでベンチャー企業が成功するのは困難であるが、Dーprocessにとって幸運だったのは、2009年にCMP工程一式を売却したいメーカーがあって、そこから格安で設備を購入できた。更にラッキーなことには、平坦化された材料同士を接着材無しでも接合することが可能になって多くの用途が広がり、いまやCMPだけでなく接合も大きなビジネスの柱に育ってきた。これらの技術をもった受託生産のできるメーカーは、恐らく世界中探してもほとんど無いと思われる。以下、若干の技術解説を含めてDーprocessのビジネスを紹介する。

1. CMPの受託生産

CMP プロセスは図1左のような装置で、研磨のメカニズムは、図1右のように、機械的に削るのではなく、スラリー中の薬液で被研磨物の表面で化学反応を行い、通常は脆い金属酸化物の膜を生成し、これを砥粒で機械的に研磨するものである。
LSIの生産では、フォトリソグラフィ工程で焦点深度をあわせるためにウエハー表面を

平坦化する工程や、ダマシンと呼ばれる銅配線の埋め込みに適用されてきた。一方、MEMS やパワーデバイスの分野では、接合前処理のために平坦化する必要がありCMP プロセスが重要である。D-process の CMP 受託加工では、以上のような分野だけでなく、平坦化が要求される金属や無機物などあらゆる材料やアプリケーションに対しても試作～量産を行っている。

D-process の応用分野における CMP 加工の一例を紹介すると、1）接合前の CMP 受託加工、2）メタル電極露出(ゴールドラッシュプロセス)、3）TSV Cu の超高速CMP、4）Si パワーデバイス、5）HDD(トラックメディア、パターンドメディア）、6)単結晶及び多結晶難削材料(SiC、GaN など)の平坦化、以上のように多方面にわたる CMP 受託加工を行っている。D－processのビジネスの大きな特徴は、スラリーを自作していることである。シリカ砥粒は外部から購入するが、薬液は自社で選定している。

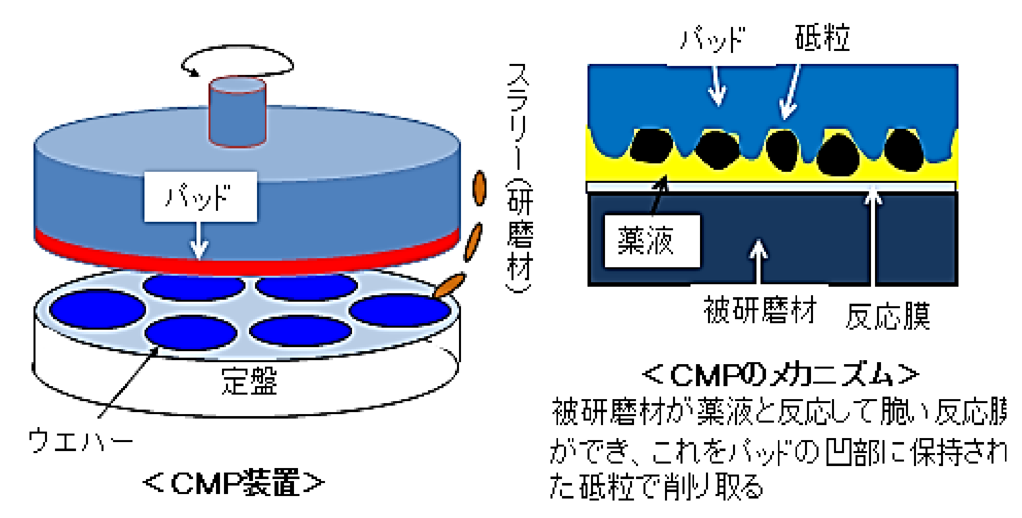


図1　CMP装置と研磨のメカニズム

2. 接合技術

物と物を接合するには、一般に接着材が用いられる。ただし、Siウエハーや MEMSなどの電子部品では、接着剤などの異物質が間に挟まれることを嫌う場合が少なくない。そこで、接着剤無しで直接接合する技術が開発されている。図2のような酸素を挟んだSi－Siの接合は比較的以前から用いられている。強い接着力を得るためには、異物が混入しないように超クリーンな洗浄が必要であり、表面をO―H（酸素―水素）終端にするため、硝酸（HNO_3）のようなウエット系の薬品で処理する。更にN_2またはO_2によるプラズマ洗浄が行われ、常温で接合される。

最も凄い技術は、原子的に見ても完全フラットな面と面を無加熱で接合する方法であろう。原子的スケールではフラットとは言えない場合は、加圧することにより2枚の面を接触させることになる。金属などは空気中の酸素と反応して酸化被膜ができているので除去する必要があり、洗浄技術やプラズマで剥離することが行われている。これ

らの接着技術を表1にまとめた。「原子的フラットで無加熱、低加圧で接着する」と簡単に言っても、これは大変な技術である。筆者は、銅と銅を張り合わせ、断面を SEM で撮った写真を見せて貰ったが、どこが接着面か分からなかった。完全に一体化されていた。

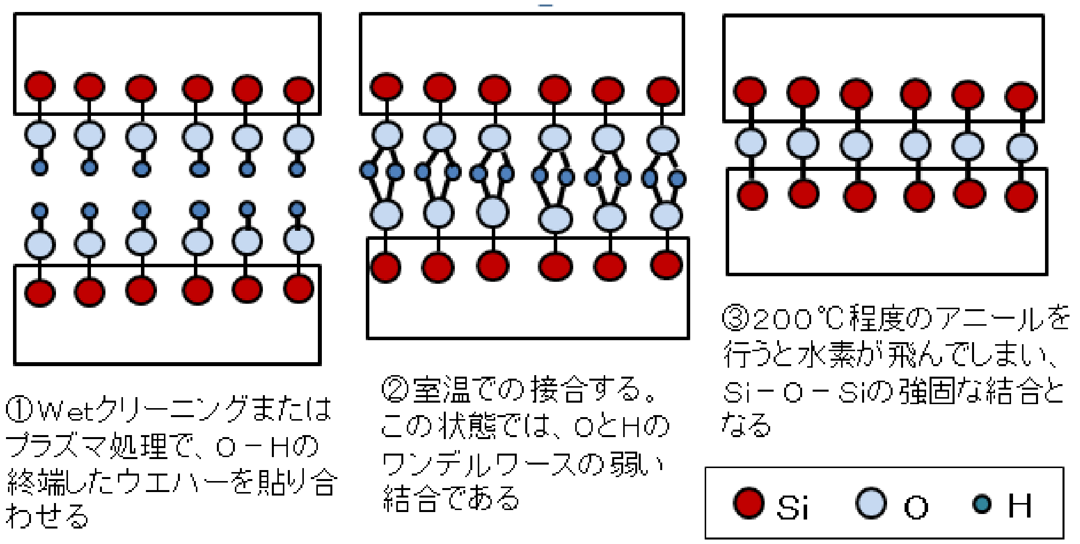


図2 Si－Si接合

接着剤使用	共晶接合／はんだ接合		AuSn／290℃など
	ガラスフリット		Pbフリー／450℃
	金属拡散接合		AuAu／300℃
			CuCu／350℃
	接着剤		ポリイミド／300℃
			シリコーン／200℃
			エポキシ／160℃
直接接合	加熱	高加圧	表面を超精密洗浄、プラズマでクリーン化
		低加圧	
	無加熱	高加圧	
		低加圧	真空orガス雰囲気

表1 接合方式一覧

3. スラリーの製作

スラリーは、被研磨の材料によって薬液の種類や濃度を決めるが、受託加工している被研磨物は、金属、半導体、絶縁物と多岐にわたり、Siやガラスが多く用いられるが、それ以外にも、単結晶酸化物（$LiNbO_3$、$LiTaO_3$、Al_2O_3 など）、多結晶材料（Poly-Si、SiC、Al_2O_3/YAG など）、金属（Au、Pt、Ag、Cu、Ti、TiN、Ni、W、Al、Sn、Pb、Zn など）、セラミックス（アルミナ、フェライト、ジルコニアなど）など、非常に種類が多い。

それぞれに適したスラリーを開発する必要がある訳である。砥粒の種類や大きさ、エッチャントの他に、インヒビター、酸化剤、保存安定化剤、接触角調整剤、増粘剤、潤滑剤、段差解消性向上剤、pH緩衝材などを調整する必要があり、これらの点が重要なノウハウとなっている。

4. 具体的な事例の紹介

4－1. 接合前 CMP 受託加工

CMPは、LSIのCu配線やSTI工程と共に発展してきた訳であるが、現在は、SiO_2やCuだけでなく、各種の材料に対して接合などを行うには接合面の表面粗さの向上が必須となっている。接合強度は接合部周辺のウエハー表面に働く原子間の引力であり、二つの表面が接近するほど高まる。鏡面加工 Si ウエハー接合では RMS が 0.3nm 以上で接合強度の低下が見られ、1nm 付近から急激に低下する。充分な接合強度を得るには、二つの表面ができるだけ接近する必要があり、その為にはウエハー表面に 1nm 以下の高品位な表面状態が必要であり、D-process の CMP 受託加工サービスでは、Ra で 0.3nm 台の平滑鏡面を実現している。
接合前 CMP の加工実績一例を紹介すると、半導体及び化合物半導体で使われる材料の Si、Cu、W、Ta、TaN、SiO_2、TEOS、GaAs、SiC、GaN、InP などの同種接合及びこれら相互の異種材料接合、単結晶酸化物の $LiNbO_3$、$LiTaO_3$、Al_2O_3(サファイア)、多結晶などがある。D-process ではスラリーの化学的作用と機械的作用の改善を行い、図3のように結晶粒界や異種材料間の段差を抑制した複合材料の表面粗さ改善プロセスを開発し、Ra で 0.3nm 台の平滑鏡面を実現している。

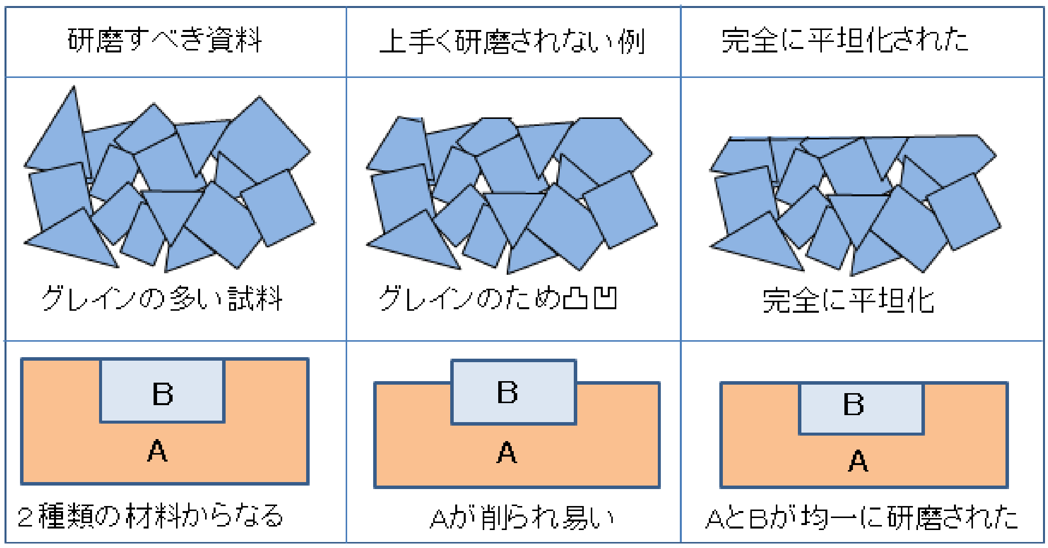


図3　結晶粒界や異種の複合材料のCMP

4－2. TSV CMP 受託加工、イメージセンサーに革命を起した

裏面照射のCMOSイメージセンサーは、図4のようにセンサー部が3μ mと極端に薄いウエハーで、回路処理用のウエハーを裏打ちのためを兼ねて接着するが、電極を接続のためTSV（Through Silicon Via；貫通電極）を用いており、TSVが量産に用いられた第 1 号と言っても良い。

図5に、厚い Cu メッキ層を CMP で削る様子を示す。TSV の Cu CMP では、LSI の CMP に比べて厚膜であるため、数時間もの CMP 加工時間を要することがあり、D-process では通常の半導体用 Cu CMP に用いられる Cu 用スラリーに対して10倍近くの加工速度のスラリーを開発した。加工時間の短縮は、数十ミクロンの Cu CMP も 10 分程度の処理時間で加工を終えることができ、スループットが向上するだけでなく、加工精度の向上にも寄与しており、パッド／ウエハー間の熱の発生を最低限にとどめ、ディッシングを極限まで低減する技術が確立された。

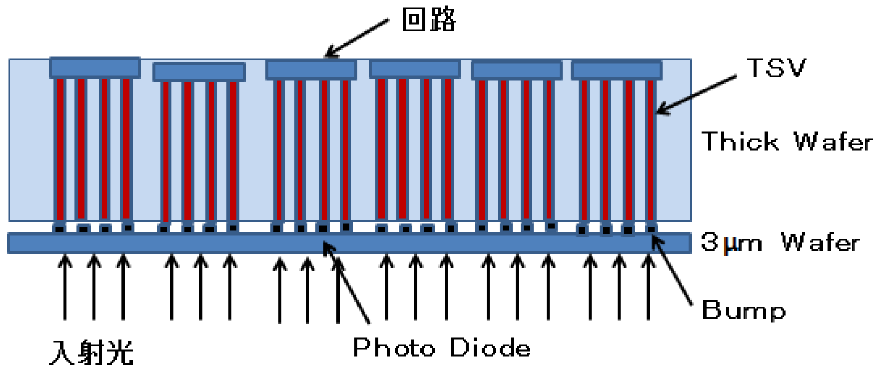


図4　CMOSイメージセンサーのTSV

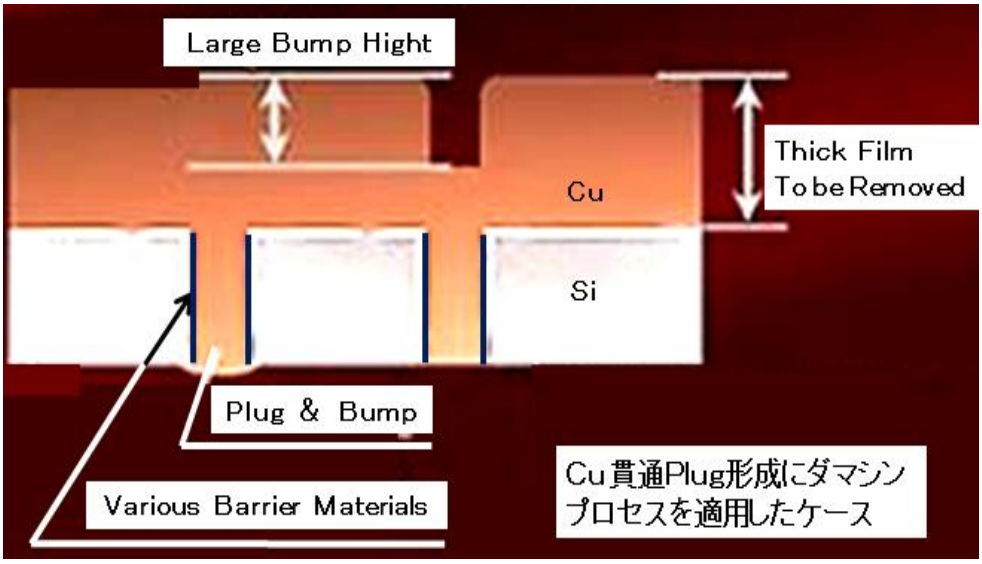


図5　TSVのCuダマシンCMPの断面図

4－3. MEMS

近年増加傾向にある MEMS-CMP プロセスとしては、ウエハー接合前の CMP 平坦化プロセスが必要である。MEMS デバイスでは 3 次元の構造体等の形成や微小な可動部分を保護するためのパッケージングのために接合が必要とされているためである。接合技術には従来から溶接、レーザー接合、拡散接合、半田付け及びろう付けなどがあるが、デバイスの微細化などで熱ダメージの問題が発生し、これを避けるため接合方法として高真空下の常温での接合が注目されている。常温でのウエハー直接接合では、原子レベルでの結合が必要とされるため、接合表面の超平坦化が要求される。このため独自に開発した CMP スラリーと特殊なポリシングパッドの組み合わせにより、単一材料又は単結晶材料では平滑鏡面を実現した。また複合材料では結晶粒界や異種材料間でも常温接合を可能となり、MEMSにとって重要な技術となっている。

4－4. パワーデバイスのスーパージャンクション CMP 加工

D-process の CMP 受託加工アプリケーションの一つとしてパワーデバイスの平坦化 CMP がある。パワーデバイスは、電車のモータ駆動装置のような大容量で高耐圧用にはスーパージャンクション構造を採用する場合が増えている。図6のような構造では、P型Si中に深いトレンチを掘りN型Siをエピタキシャル成長させ、図6のような Si 膜の平坦化が要求されるが、加工対象材料の基板と膜質が同種の Si 系となっているので、どこでCMPをストップするのか難しい。途中で正確にCMPを終了することが困難なので、ストッパー層となる薄膜を挿入することで解決している。ただし、図6のようにディッシングが出来ないような技術が要求される。

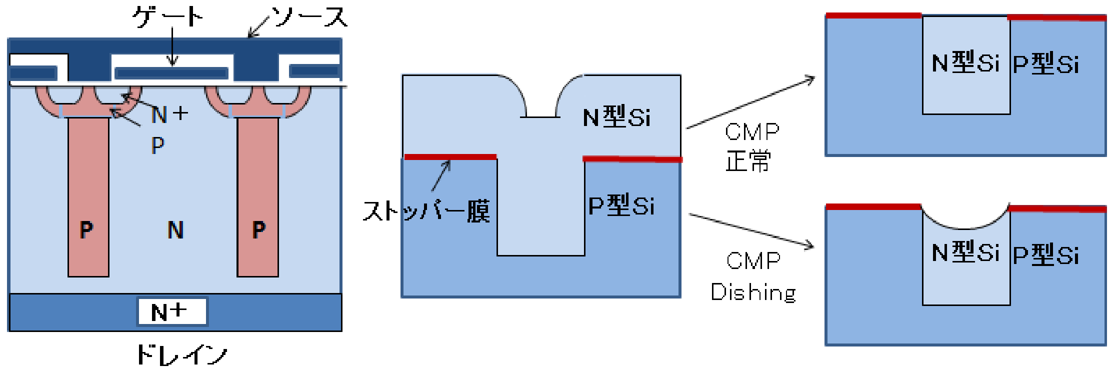


図6　パワートランジスタのスーパージャンクション構造
Si上のSiをCMPする必要があり、ストッパー膜を利用する。
Siとストッパー膜のCMP選択比の大きいスラリーを用いる事、
終点検出を厳密にし、ディッシングが生じないようにする。

４－５. 難削材料 SiC、GaN の CMP 加工

近年、パワーデバイスに用いられる難削材料の単結晶 SiC、GaN や、多結晶に対して表面粗さの Ra で 0.3nm 以下が要求される。これら難削材料の加工は一般的なポリッシングでは達成することは非常に困難であるが、D-process では CMP プロセスで解決致し Ra で 0.1～0.3nm を達成した。多結晶のグレインの大小に左右されることなく表面の精度を確保している。

また、表面粗さを整えた多結晶の難削材料に絶縁層を堆積することが一般的であり、その絶縁層の表面粗さに対しても Ra0.2nm 以下を達成した。

D-process では CMP 加工後の超精密洗浄にも重きをおいておりお客様の次工程にもスムースに移行可能である。

４－６. フライホイール用超伝導材の開発

太陽光発電などは、自然現象次第で電力供給の変動が大きく、安定化できる容量の大きい蓄電器が望まれており、このためフライホイール蓄電システムが開発された。フライホイール（弾み車）は重量4トン、直径2メートルで、出力は300キロワット、蓄電容量は100キロワット時が開発されている。回転による摩擦抵抗を無くすため、超電導軸受によりフライホイールを浮上させて非接触にし永久的に回転しエネルギーを失うことがない。毎分6000回の回転数である。電気が必要な場合は、運動エネルギーを電気エネルギーに変換して取り出す。超電導電線は電気抵抗がゼロで、銅電線に比べて50倍の強力な磁力が得られる。超伝導の材料はNbN（窒化ニオブ）の薄膜を600枚も重ねたもので、D-Process の技術が必要とされている。

各種の大容量蓄電装置の効率は、バッテリーが75～80%、揚水発電が65～70%、フライホイール蓄電が85%と言われており、今後フライホイールがメガワットクラスの蓄電に利用される可能性がある。

６. まとめ

Ｄ－processは一昨年、神奈川県大和市にクリーンルームを建設され、これに4億円を投資したのは、企業規模から言って思い切った決断だったと思われる。ベンチャーが成功する要因は、色々なケースがあるが、Ｄ－Processの場合は、最先端の技術を用いて受託生産を行い、接着剤なしの直接接合と言う新しいアプリケーションの要求にピタリ対応できたことが挙げられる。材料も経験のない接合依頼が増えて来ると思われ、技術力を更に高めることと、生産の規模拡大も要望されている。ほとんど競合企業がないだけに、業界の要求に対して、昆虫が脱皮して成長するように、漸増ではなく脱皮的な発展が予想される。

高性能電子顕微鏡なら日本電子株式会社

原子の大きさ程度は楽々観察できるようになった高性能電子顕微鏡は、あらゆる産業界に用いられ、医学の発展にも大きな貢献をしている。その電子顕微鏡とともに歩んだ67年、益々高度な技術で発展を遂げているのが日本電子株式会社（以下、JEOLと略す）である。

1．透過電子顕微鏡；TEM（Transmission Electron Microscope）

1－1．電子顕微鏡の全体図

電子顕微鏡の構成と電子の行路を図1に示す。一番上の電子銃の負に印加された電子は、陽極のゼロ電界に引かれて陽極のアパチャ—を通り、第１コンデンサーレンズを通りコンデンサー絞りで焦点を結ぶ。コンデンサー絞りの微少なアパチャ—が、点光源となる。第2コンデンサーレンズで並行ビームとなって試料に照射し、透過した電子がレンズ系で拡大されて蛍光板に投影される。蛍光板の像は、CMOSイメージセンサーなどのカメラで撮影され、テレビ画面で観察される。

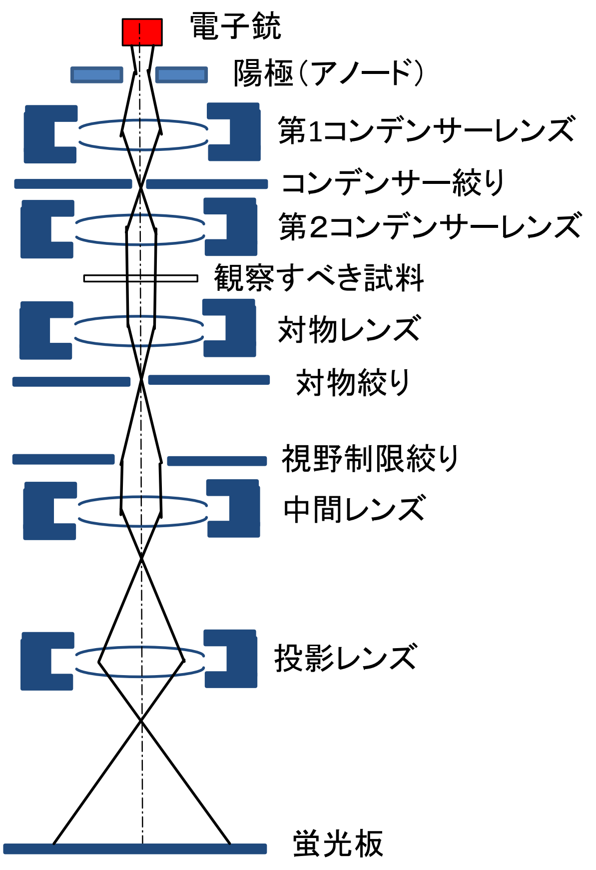


図1　透過型電子顕微鏡の構成

1－2. 電子銃

金属内から電子を取り出す方法として、

①金属などでは、非常な高温になると表面のバリアを越えて電子が飛び出してくる。タングステンや六硼化ランタン（LaB_6；ラブロクと呼ばれる）などの陰極を加熱して熱電子を放出させる方式の電子銃が用いられる。

②熱電子放出が有効に起こる温度より低温（～1500℃）で電子銃を加熱しておき、強電界をかけて電子を放出させる。表面のポテンシャル障壁を下げるのでショットキー型と呼ばれる。実際にはタングステンの表面を酸化ジルコニウムで覆って仕事関数を下げて(～2.7eV)、電子を放出し易くしている。電流の安定性が優れているので電子顕微鏡の光源として広く普及している。

③タングステンチップを1300℃以上に加熱して、さらに強い電界をかけてポテンシャル障壁(～4.5eV)を量子論のトンネル現象を利用して電子を放出させる方式の電子銃。エミッタを常時加熱しているためチップの表面に残留ガスが吸着せず、長時間にわたって安定な放出電流が得られるため、微小領域の分析に有利である。

1－3. レンズ系

電子ビームの軌道を曲げて、集束や発散させるには、磁界や電界を用いることになる。磁界の場合は、フレミングの左手の法則で知られているように、磁界と電子の運動方向との直角方向に力が働くことを利用する。図1、2のように、コイルの電流によって発生する磁界により電子線を曲げる。コイルへの電流を変えると発生する磁界が変わり、焦点距離や倍率を変えることができる。対物レンズは、試料を出射した電子が結像するための初段のレンズで、このレンズの性能が像の質(分解能、コントラストなど)をほぼ決める。球面収差係数と色収差係数を小さくする工夫が重要である。

一般には磁界型レンズが結像に用いられるが、静電界により電子線を集束させるレンズもある。

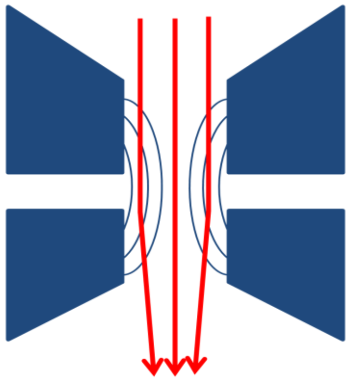


図1　磁界による電子ビームの収束

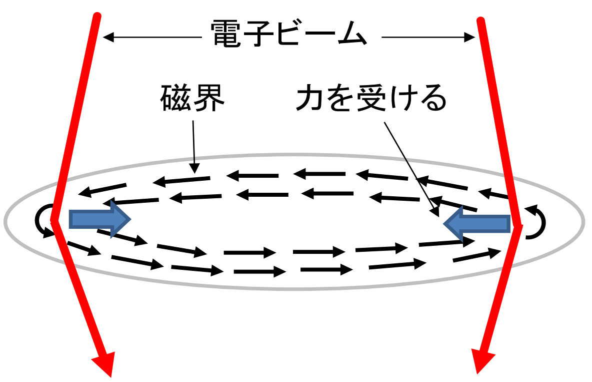


図2　磁界により電子ビームが集束する様子

1－4. 真空系

電子顕微鏡は、原子オーダーの微細な試料を観察するので、わずかな残留ガスなどが試料表面に吸着すると正しい観察ができない。そこで、装置内は残留ガスの少ない極めて清浄な超高真空に保つ必要があり、用途に応じた真空ポンプが用いられる。表１は電子顕微鏡に用いられる主なポンプである。

油拡散ポンプ	油を高温に加熱し、高速油蒸気の勢いで気体分子を輸送するポンプ。オイルフリーではないので、透過型電子顕微鏡のカメラ室の排気に用いられる。
スパッタイオンポンプ	チタンのカソードをスパッタし、アノード表面のチタン薄膜で気体分子を吸着する。10^{-4}～10^{-8}Paの高真空が得られ、電子顕微鏡の電子銃室や鏡筒の排気に用いられる。
クライオポンプ	極低温の面に気体分子を吸着させるポンプ。真空度は10^{-2}～10^{-13}Paが得られる。液体窒素で冷却したフィンが用いられる。
スクロールポンプ	渦巻状の羽根を回転させて、気体を外側から中心へ送り込んで圧縮して排気するポンプ。オイルフリーで、圧力範囲は10^{5}～10^{1}Pa
ターボ分子ポンプ	高速で回転するロータにより気体分子を排気する機械ポンプ。排気する気体の種類を選ばないので水分の排気に強く、生物分野の電子顕微鏡に使われることがある。圧力範囲は10^{-1}～10^{-8}Pa。

表１　電子顕微鏡に用いられる主な真空ポンプ

1－5. 得られた画像の例

電子顕微鏡で得られた試料の内、典型的な例を2つ取り上げる。
図３はグラフェンの結晶構造の写真である。グラフェンはグラファイトの１層で、多くの面白い物性により注目されており、LSIの材料なども、いずれシリコンからグラフェンになると言う意見すらある。完全な6角格子になっているが、写真では一部に欠陥が見られる。図４は、半導体のｎ－MOSFETの断面で、ソースとドレイン側に欠陥が発生しているのが見える。

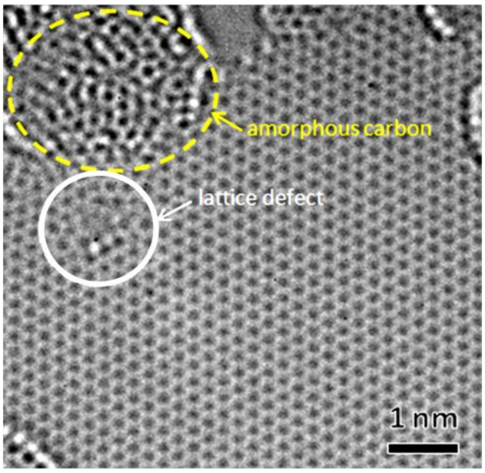


図３　加速電圧 80 kV で取得された単層グラフェンの高分解能 TEM 像

グラフェンが六角格子を組んでいる。
太い実線で囲んだ領域は格子欠陥で、
破線で囲んだ領域ではアモルファス

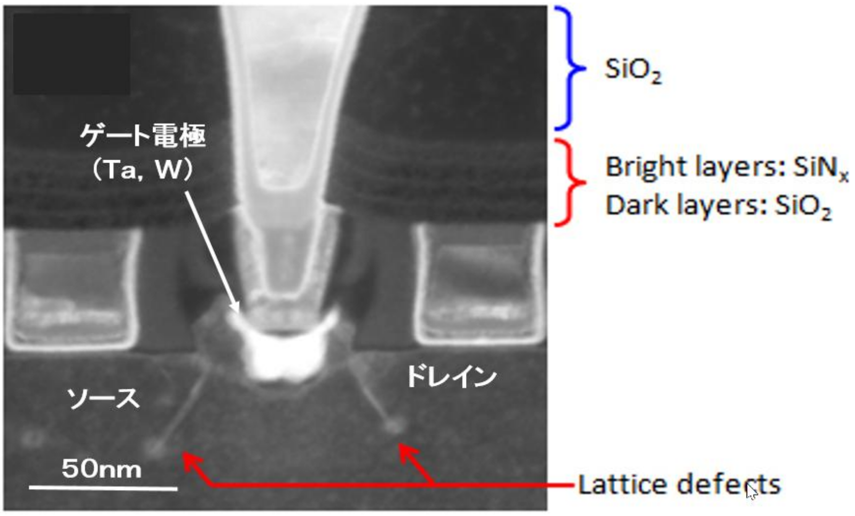


図4　半導体素子(n-MOSFET)の断面薄膜試料の STEM 像
Ta や W など重い元素の存在する部分が明るく観察されている。
格子欠陥もクリアに観察されている。

1－5. 超高圧電子顕微鏡

1000kV 以上の高加速電圧の電子顕微鏡で、電子は波長が 0.00087nm にまで短くなり、0.1nm 程度の高分解能が得られ、その結果、炭素などの軽元素が明瞭に見られる。更に、超高圧電子顕微鏡の特徴は、試料に対する透過能が高く厚い試料の観察ができること、電子線照射による損傷の研究ができることなどである。

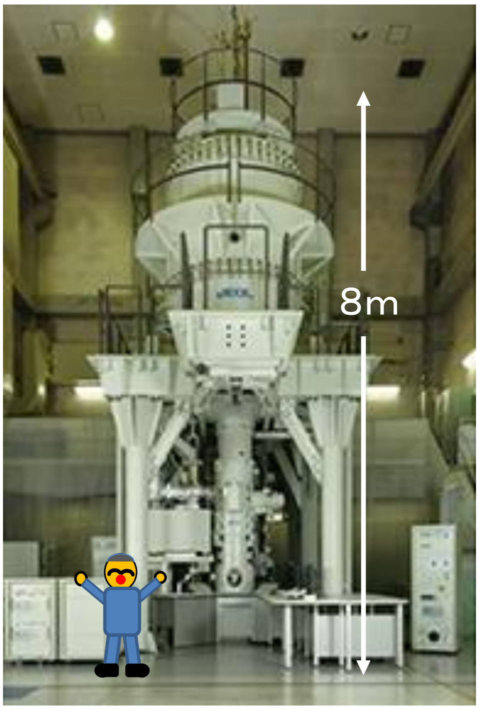


図5　巨大な超高圧電子顕微鏡

2. 走査型電子顕微鏡;SEM(Scanning　Electron　Microscope)
透過型電子顕微鏡が広い面積を照射するのに対して、SEMは電子ビームを細く絞って試料表面をX－Y方向に走査する。電子ビームの照射により図6のような粒子が飛び出てくるが、主に2次電子が利用され、試料表面の凹凸などが観察できる。光学顕微鏡よりはるかに微細な像が得られ、比較的手軽に扱える装置が市販されて産業界で一般的に用いられている。SEMは表面を観察する装置であるが、透過型のSEMもあり、ステム;STEM(Scanning Transmission Electron Microscope)と呼ばれる。

3. 集束イオンビーム;FIB(Focused　Ion　Beam)
液体の金属ガリウムから飛び出したGaイオンを、電磁レンズで細く絞って試料に照射し、反射してくる各種の粒子を検出するのがFIBである。SEM同様に試料の上をX－Y方向に走査する。Gaイオンは電子よりはるかに重いので運動エネルギーも大きく、照射されて飛び出す粒子も図6のように色々あって、用途によってそれぞれ観測に使われる。また、FIBは加工にも用いられ、半導体チップの欠陥箇所をエッチングしたり、膜をつけたりすることもできる。

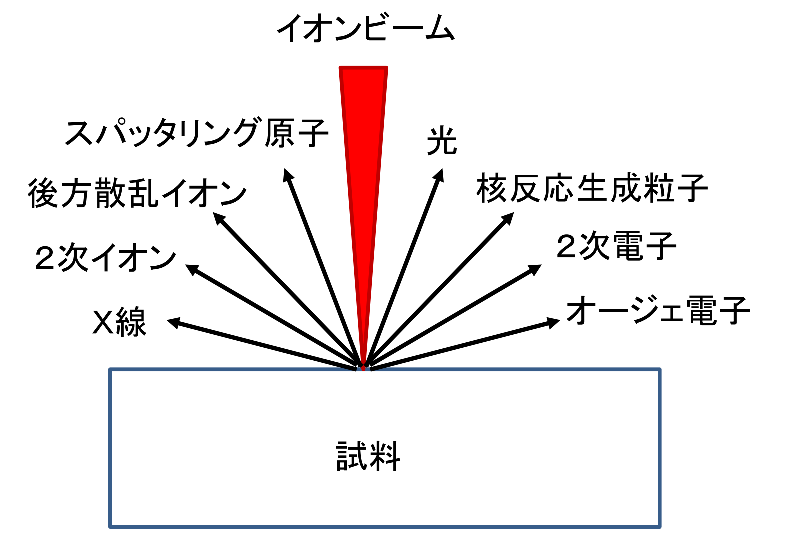


図6　イオン照射で発生する粒子

4. 核磁気共鳴装置;NMR(Nuclear　Magnetic　Resonance)
原子番号と質量数がともに奇数の原子核は、磁気双極子モーメントを持ち、小さな磁石と見なすことができ、磁場をかけると歳差運動を行なう。この原子核に対して同じ周波数で回転する回転磁場をかけると磁場と原子核の間に共鳴が起こり核磁気共鳴と呼ばれて、これを観測するのがNMR装置である。従って、観察対象となる原子は主に水素または炭素(通常の ^{12}C ではなく核スピンを有する奇数の質量の同位体 ^{13}C を

測定する）であり、高分子の観測に適している。応用分野は製薬・バイオ・食品・化学だけでなく、有機ELや電池フィルムなどの新しい分野にも活用されている。JEOLでは、創業間もない1956年に国産第1号のNMRを開発しており、図7はその時の古い写真である。以来JEOLは、NMRのメーカーとして世界的に知られている。

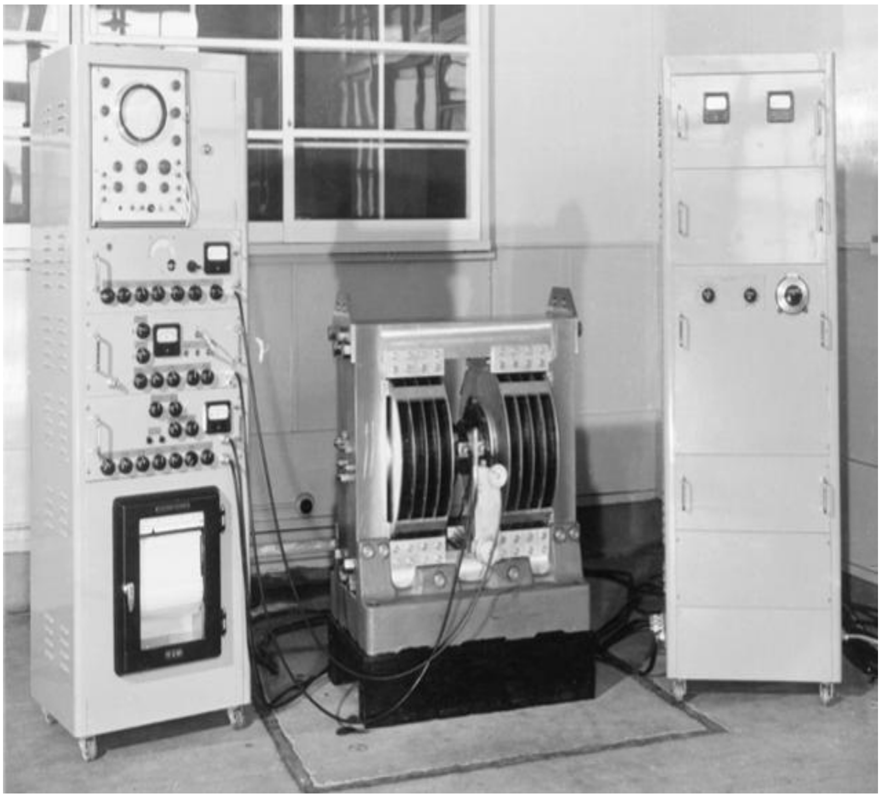


図7　JEOLが開発した国産第1号のNMR装置

5. マスク製作用で電子ビーム描画機

LSI生産のパターニングにはステッパーが用いられ、それに使用されるマスクは電子ビームで描画されている。現行のVSB（Variable　Shaped　Beam）方式のEB装置では、1枚のマスク描画に数十時間／枚も掛かることがあり、そのブレークスルーとして電子ビームの数が26万本、即ち512×512本と言うマルチビーム方式が期待され、JEOLではオーストリアのIMS社と共同でマルチビーム露光機を開発された。この装置なら描画時間は10時間程度に短縮され、LSI生産の大きな福音となる。図8はその構造であるが、26万本ものビームを制御する大変な装置である。

超微細化の EUV 露光機が実用になって、このマルチ描画機が活躍することになってきた。

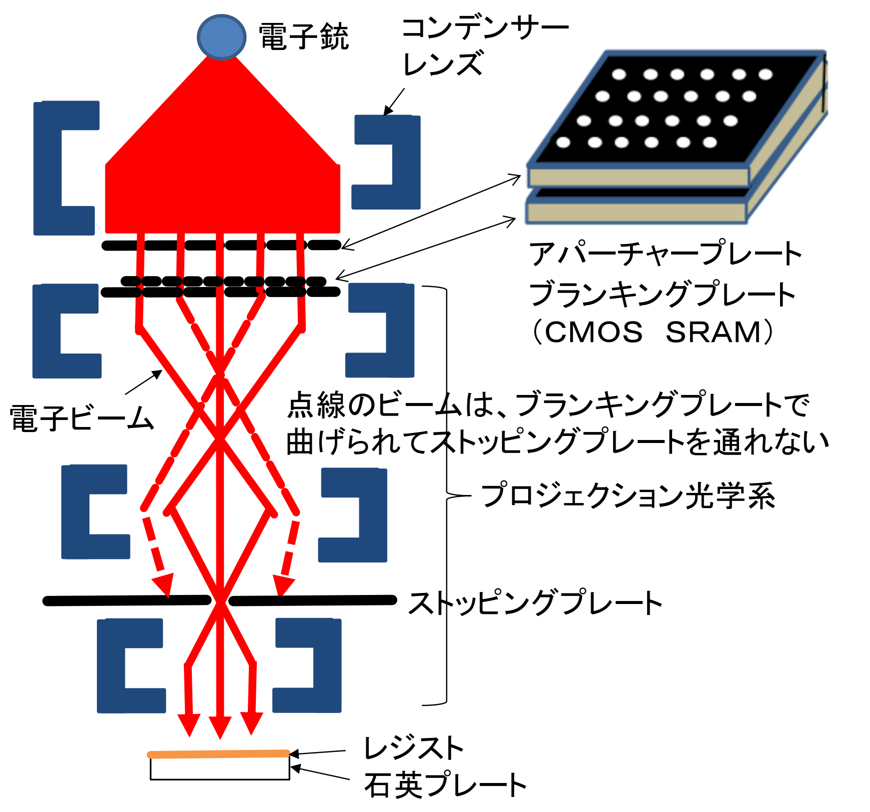


図8　マルチビームのマスク描画機
512×512本の平行ビームをブランキングプレートのアパーチャーを通し、CMOS－SRAMの電界によって曲げられたビーム（図の点線）は、ストッピングプレートで阻止されてフォトレジストに達しない。

6. 電子ビームを用いた3Dプリンター
ここ10年ほど、3Dプリンターが産業界に用いられ、極めて微少な部品の製作、骨のような硬い部品の他、コンクリートの住宅まで作ったと聞いて驚いた。一般には紙に印刷するのと同様にしてプリンターでパターンを描き何層にも積んで行く。電子ビームでの3D プリンターは、薄く敷き詰めた粉末を電子ビームで溶かしなら積層して行く方法で、今後商品化を企画して種々の部品やユニット製作に利用されて行く予定である。

7. まとめ
紹介が後になってしまったが、JEOLは戦後の1949年に日本電子光学研究所として設立され、直ちに電子顕微鏡を完成し、1956年にはフランスに輸出もされている。その後も、各種の電子顕微鏡を開発し、更にNMR、FIB、クロマトグラフィなど高度な

分析機器を産業界に提供し続けて、技術オリエンテッドな特色のある企業として発展されている。重要な基本となる技術は全て自社で開発されているのが、企業の大きな財産となっている。資本金は１００億円、年間売上は約１０００億円、社員は約３０００名の中堅企業である。JEOLが、これまで通り地道な努力で更に技術力を磨き、「世界のJEOL」として尊敬され発展されることを望みたい。