

創立100周年記念論文

イオン注入装置事業と技術のあゆみ

History of Ion Implanter Business and Technology

内藤 勝 男*	山下 貴 敏*
M. Naito	T. Yamashita
丹上 正 安*	小西 正 志*
M. Tanjyo	M. Konishi
奥手 康 弘*	濱本 成 顕*
Y. Okute	N. Hamamoto

概要

イオン注入装置技術は1973年、ハイボルテージ・エンジニアリング・ヨーロッパ社（HVEE社）から日新ハイボルテージ株式会社に技術導入されて以来、日新電機本社において事業化のための開発が行われたのち、1999年に日新イオン機器株式会社として独立し、その技術を受け継いできた。そして現在に至る43年間に多種多様な注入装置を世に送り出してきた。本稿ではこれらの歴史について解説する。

Synopsis

Technologies related to the ion implanter were firstly introduced from High Voltage Engineering Europe Co., Ltd. to Nissin High Voltage Co., Ltd. in 1973. Thereafter, the basic development and commercialization were carried out at ion implanter business unit of Nissin Electric Co., Ltd.. In 1999, Nissin Ion Equipment Co. Ltd was established as a subsidiary of Nissin Electric to expand this business and released many types of ion implanters with continuous technology development. We are to review our history of ion implanter business and technologies.

1. はじめに

イオン注入装置の開発は研究用の小・中電流機3機種から始まり、生産機として中電流機（NHファミリー 9機種、EXCEEDファミリー 12機種）、大電流機（PRファミリー 4機種とEXCEED8000）、及びFPD製造用（IDPファミリー 3機種、iDファミリー 2機種、iGファミリー 4機種）の計38機種にもものぼる。この間、1、2年の間に新しい機種を市場投入してきたことになる。この継続的な新機種開発は、半導体やディスプレイという最終製品の高集積化・高精細化のためのプロセス的要求と基板（ウェーハ、マザーガラス）の大面积化による生産性向上要求への必須の対応として、その時々において開発の必要性を判断して実施されたものである。これらのなかには、技術的には大きな成果をもたらした機種であっても、必ずしもそれがその時の直接のビジネスの成果に結びつかなかった機種も多い。しかしながら、ビジネ

的に成功した装置の根幹は、それまでにチャレンジ、蓄積した装置技術に支えられており、技術の蓄積は新機種の開発によって促進される。新機種の成否を分ける要因は種々あるが、装置コンセプトの単純明確さとそれを支えるキーテクノロジーをいかに早く準備して、タイミングよく集中開発できるようにすることが要件であろう。下記には、新機種として市場投入した代表的な装置についてどのような技術的進歩をどのように実現してきたかを年代順に略述する。

2. 半導体用イオン注入装置の技術の系譜

2. 1 半導体イオン注入装置関連事業の沿革

2. 1. 1 イオン注入装置の歴史的発展経過

イオン注入装置は半導体製造プロセスにおいてシリコンや化合物半導体基材に、ホウ素、リン、ヒ素などの不純物元素を打ち込むための荷電粒子加速装置

*日新イオン機器株式会社

で、現在、各種IC、VLSIの製造に不可欠の装置となっている。イオン源から各種元素のイオン化された粒子を高真空中に引き出し、加速する技術は、歴史的に見れば、1930年代から原子核物理の分野で開発された荷電粒子加速器、同位体元素分離器の技術を基にしている。高エネルギー粒子を固体に打ち込むと、その諸性質が変化することについては古くから多く研究されてきたが、半導体の電気的特性改善のためにこの技術を利用する研究は1950年ごろから始まった。

1960年ごろから、半導体デバイス製造にイオン注入法を用いようとする研究が本格的になってきたが、装置はそれまでの核物理研究用加速器に少し手を加えた程度で、まだ工業的に適したものにはなっていなかった。

1970年ごろに至り、Lintott 社（英）、DANFYSICS 社（デンマーク）、HVEC社（米）などから工業用イオン注入装置が発売された。

1970年代に入り、従来の熱拡散法に比べ、特に低濃度イオン注入によりMOSFET（Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor）のしきい値を正確に制御できるイオン注入技術が確立し、これを工業的に可能にしたイオン注入装置の技術革新、すなわちビーム量の増大、装置の信頼性、安定性の改善、ウェーハ処理能力の向上などにより、半導体基材への不純物ドーピングのほとんどのプロセスが、熱拡散法からイオン注入法に置き換わった。

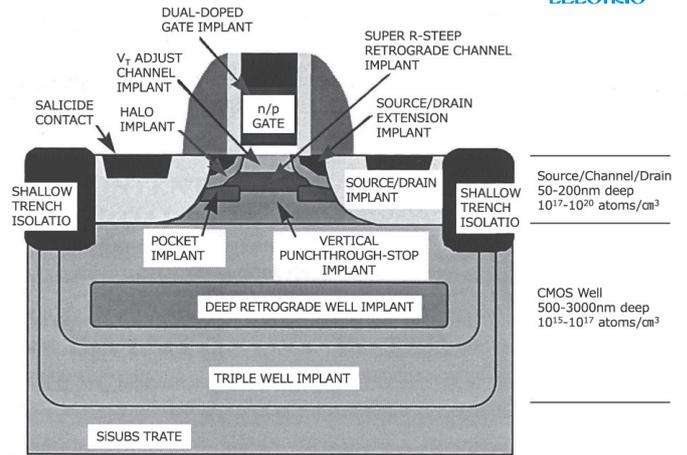


図1 半導体構造と注入プロセス

2. 1. 2 半導体イオン注入プロセスとイオン注入装置の分類

ICデバイスの基本構造のMOSFETの模式図とイオン注入が行われる部位を表した図を図1に示す。⁽¹⁾ トランジスタには、P型（P-N-P）MOSFETとN型（N-P-N）MOSFETの2種類があり、これらを組み合わせたCMOSFET（Complimentary MOSFET）がIC論理回路の基準単位である。典型的なトランジスタ形成において1水準のV_t（Threshold Voltage：しきい値電圧）を持ったCMOSFETのSRAM製造に必要なイオン注入プロセスは11工程ある。最新のICの例では3水準、4水準といった複数のV_t値を持ったトランジスタを1個のICに製造する関係で更に工程数が増えて30工程以上のイオン注入が行われている。半導体生産工場において、これらのイオン注入プロセスを実際に処理するには、その注入プロセスに必要な注入エネルギーと注入量に対応して、中電流、高エネルギー、大電流及び高ドーズ装置の4種類のイオン注入装置が用いられている。それぞれのイオン注入機のカバーするエネルギーと注入量の範囲を図2に示す。

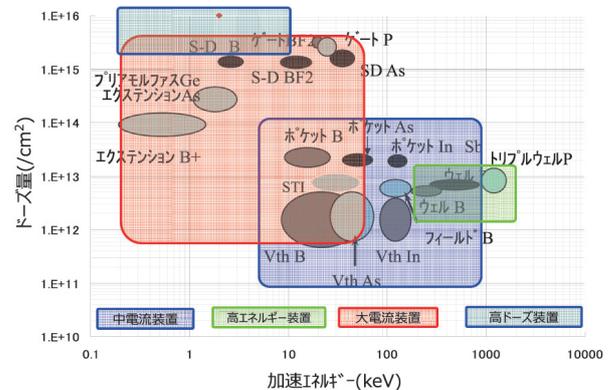


図2 イオン注入プロセスとイオン注入機の分類

2. 1. 3 当社イオン注入装置事業の沿革

当社の半導体用イオン注入装置事業の沿革を表1に示す。

日新電機は、1970年に粒子加速器メーカーのHVEC社と共同で日新ハイボルテージ株式会社（NHV）を設立、1973年12月にHVEC社（HVEC社のオランダ子会社）よりV_t制御用イオン注入装置製造技術を導入して事業に参入した。導入技術と日新電機固有技術を融合させ独自のイオン注入装置を開発した。研究用装置では30～500keVの広エネルギー範囲の注入装置、生産用装置ではV_t制御用の中電流イオン注入装置（NH-20シリーズ）メーカーとして独自の地歩を築いた。

他方、1980年にはウエスタン-エレクトリック社（米）よりトランジスタのソース・ドレイン電極の表面に高ドーズ注入を行うプレデポジション装置PR-30の製造技術を導入し、大電流イオン注入装置でも市場参入を果たした。1985年には生産用高電流装置PR-80を、1988年後継機種であるPR-80Aをそれぞれ投入し市

表 1 半導体用イオン注入装置事業沿革

年	1973 ~	1980 ~	1990 ~	2000 ~	2010 ~ 2015
DRAM Pitch Node (nm)	2700nm~	1200nm ~	370nm ~	150nm ~	48 ~ 25nm
ウェーハ 直径Φ (mm)	4 ~ 5" (100 ~ 125mm)	6" (150mm)	8" (200mm)	12" (300mm)	12" (300mm)
半導体 適用 プロセス	事業 製品名	・ NHV内 創業 HVEE社と技術 提携	・ イオン(事)設置	・ 回転注入I/I 市村産業賞受賞 ・ 日新イオン機 器(株)独立	
閾値制御 LDD 形成	M I/I NH シリーズ	・ 200keV MI/I 開発	・ 回転注入 NH20SR 発売 ・ 8" 電場平行 NH20SP 発売		
ウェル形成	HE I/I NH40/45		・ 400keV-NH40SR 発売	・ 450keV-NH45SR 開発	
閾値制御 ハロー・ポケット	M I/I EXCEED シリーズ			・ 8" 磁場平行 EXCEED2000 発売 ・ 新型プラテン EXCEED2000A 発売	・ 12" 磁場平行 EXCEED2300H 発売 ・ 重イオン用 EXCEED2300V 発売 ・ 高 T/P EED3000AH 発売 ・ 高エネルギー EXCEED9600 発売
パワー Tr コンタクト	高温注入 I/I IMPHEAT				・ 6"SiC 高温注入 IMPHEAT 発売
ソース・ドレイン・ ゲート 低抵抗化	H I/I PR・EX シリーズ		・ AT&T30keV HI/I 導入 ・ 80keV PR80 発売	・ 8"80keV EXCEED8000 開発	
イクステンション 極浅接合	LE I/I CLARIS				・ 12" クラスター注入 CLARIS 開発

場拡大を図った。

また、1988年にはウェル注入等の高集積化プロセス用に後段加速電圧を増強した生産用高エネルギーイオン注入装置NH-40シリーズをリリースした。

1989年には8インチウェーハ用の中電流装置NH-20SPを発売した。本装置は電場によって走査された放射状のビームを平行ビームにする方式の装置である。1995年にはビーム量と注入均一性などの性能を大幅に向上させた磁場走査及び平行化方式のEXCEEDシリーズをリリースした。

他方1990年にはECRイオン源とプラズマフラッドガンを備えた8インチウェーハ用の大電流装置PR-80EX/EXCEED8000を開発、市場投入した。

2008年にリリースしたCLARISは、クラスターイオ

ンビームを用いた極浅接合形成用低エネルギー注入装置である。

2009年に発売したIMPHEATは、高温加熱したSiC基板に注入する中電流イオン注入装置である。

2. 2 半導体用イオン注入装置の歴史と技術の推移

2. 2. 1 中電流NH-20シリーズ⁽²⁾

図3はシングルプラテン型エンドステーションを搭載した中電流装置：NH-20SRである。イオン源=分析マグネット=加速管=Qレンズ=X-Yビーム走査電極=ロボットハンドエンドステーションで構成されており、日新電機のNHシリーズ中電流装置の基本構成をなす。ウェーハ搬送や制御システムを自動化して生産用装置としての信頼性を確立した。

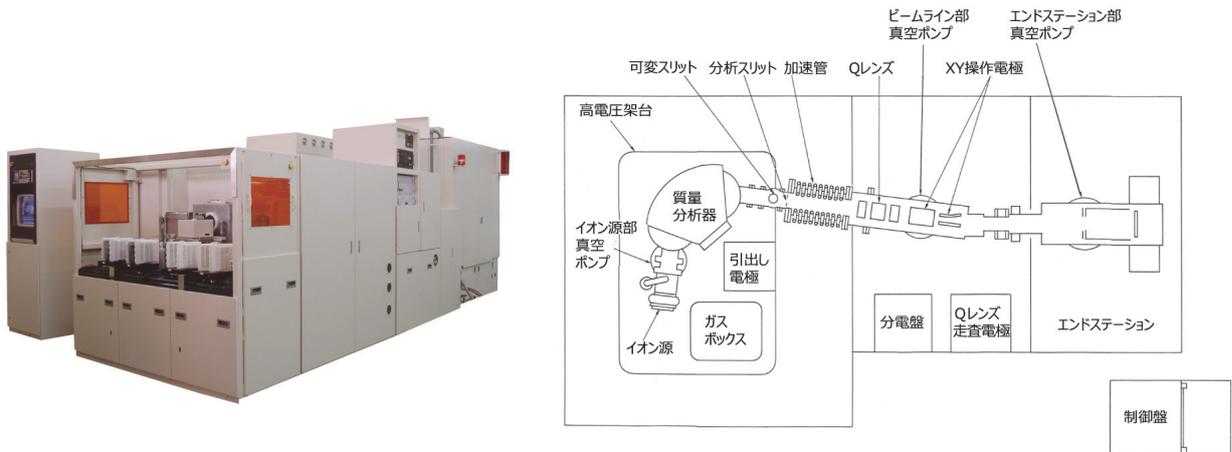


図3 NH20-SR

図4に示すのは、当社が世界に先駆けて製品化したNH-20SRの回転注入機構エンドステーション構成図である。通常のイオン注入では、ビームの静電走査機構によりイオンのウェーハに対する入射角度は、ウェーハ中心と周辺部で2~3°異なる。このため、ウェーハ表面にパターンによる段差がある部分では、段差の周辺部に陰ができてイオン注入されない領域が生じる。これをシャドウ効果と呼び、DRAMメモリでは面内のデバイス特性ばらつきの問題となった。これらの課題に対応するため、注入中にビームに対してウェーハ自身が回転する機能を持ち、広範囲の注入角度可変機能をもつエンドステーションの開発を行なった。本回転注入機構エンドステーションは、半導体デバイス性能を画期的に改善したとして1993年に市村産業賞を受賞する榮譽を受けた。

その後上記の様な角度ばらつきをおさえるため、ビームの走査を2段とし、後段で逆走査させることで一方向のビーム走査を平行化した上で、ウェーハを垂直方向に弧状往復運動させる事で注入を行う

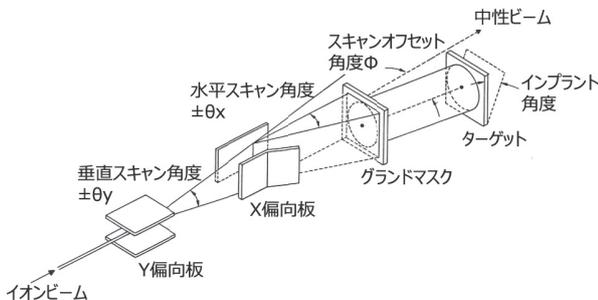


図4 回転注入機構

NH20SPを開発、リリースを実施した。本装置は後のEXCEEDの平行ビーム注入システムの基礎を確立したものであった

2. 2. 2 高エネルギーNH-40シリーズ⁽³⁾

NH-20SRを基に生産用高エネルギー装置として後段加速系をアップグレードしたのがNH-40SRであり、更にエネルギーを増加したのがNH45SRである。新規開発要素は、450kV対応縮小形シールドキャビネットと、多価イオン源、およびエネルギーコンタミ除去・監視系である。縮小形のシールドキャビネットを採用することによって、装置の全長は短く抑え、かつ、角度スキャンを用いることから生じるウェーハ面内の注入角度差は、NH-20SRと同一の2.3度に保っている。また、エネルギーコンタミ粒子の混入を極少化及びレジスト付きウェーハ注入時の脱ガス対策に対応するため、真空排気性能を強化した。

また、MeVでの注入を可能にするため、多価イオンビーム電流を増強した2段放電型イオン源を開発した。第1放電室で生成したプラズマ電子は中間電極から第2放電室に引き出され、メインプラズマが形成されるDuo-PIGatron型の電極配置を持つ。本イオン源では、 B^{2+} : 300uA, P^{2+} : 1.8mA, P^{3+} : 500uAの多価イオンを引き出すことができた。

2. 2. 3 中電流EXCEEDシリーズ⁽⁴⁾

(1) EXCEED2000/2000A

デバイスの進化と共に、ウェーハに対する入射角を常に一定に保つ平行ビーム注入機構は必須の機能となってきた。図5は、EXCEED2000Aの概要図である。イオン源=分析マグネット=加速管=エネルギー

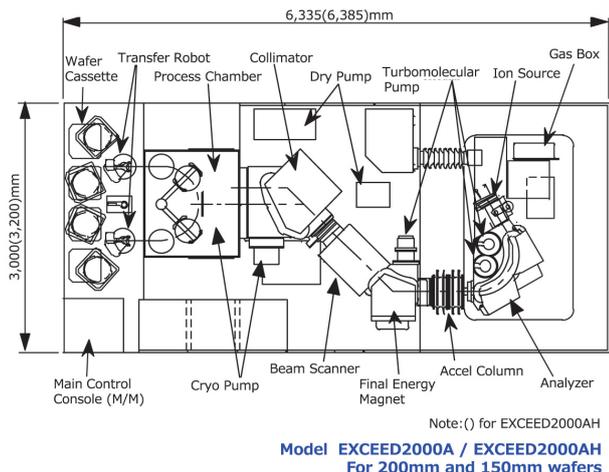


図5 EXCEED 2000A

フィルターマグネット（以下FEMと呼称）＝ビームスイープマグネット（同BSM）＝平行化マグネット（同COL）＝シングルプラテンエンドステーションから構成されており、以後のEXCEEDシリーズは全てこの構成からなる。

EXCEEDシリーズでは、直流＋交流電流の合成によりBSMを励磁して、イオンビームを水平に高速走査後、COLにより平行な走査ビームを形成している。磁場による高速走査は、当社が独占使用している技術であるが、電場走査に比べ、空間電荷効果によるビームサイズの拡大が抑えられるためビーム輸送中のロスを少なくできる。注入量、ビーム平行度及びビーム均一性はウェーハ前後に取り付けられたマルチファラデーでの計測結果からBSM励磁電流などにフィードバックされ制御される。

FEMは当時他社に先駆けて搭載された機能で、本シリーズを特長づける機能要素のひとつである。すなわち加減速後にビームに含まれるエネルギーコンタミ成分を完全に除去することができ、トランジスタのVtばらつきを抑制する製造プロセスのキーポイントとなった。図6に、FEM近傍のビームライン構成図を示す。加速管で加減速後のビームに含まれるエネルギーコンタミ成分は、FEMで質量分離されBSM入り口に設けたスリットで完全に除去される。エネルギーコンタミを含むビームが注入されると、注入深さや注入量が所要の値からはずれてVtばらつきの原因となる。本機能の搭載による完全なエネルギーコンタミ除去の達成は、量産プロセスへの分子イオンや多価イオンの積極的利用を実現した。現在では、中電流イオン注入機には何らかのエネルギーフィルタを設けるのは標準と成ったが、本シリーズで採用しているマグネットによる運動量分離方式が装置構

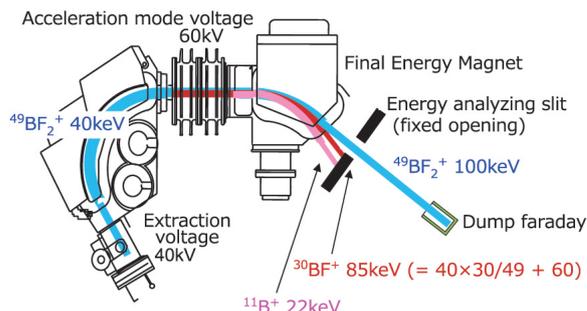


図6 FEMによるエネルギーコンタミ除去

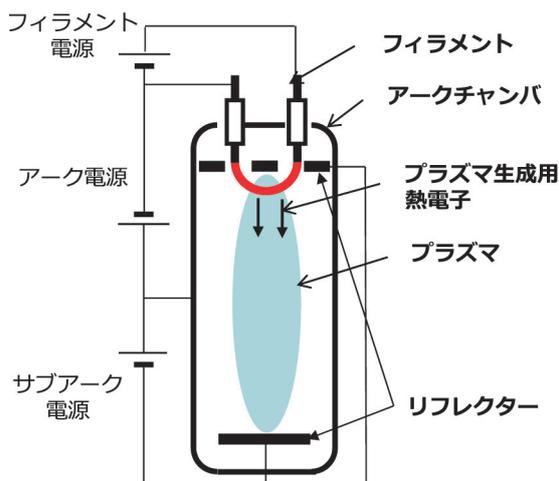
成上もっともエネルギーコンタミ除去能力を大きくできる。

(2) EXCEED2300H、2300V

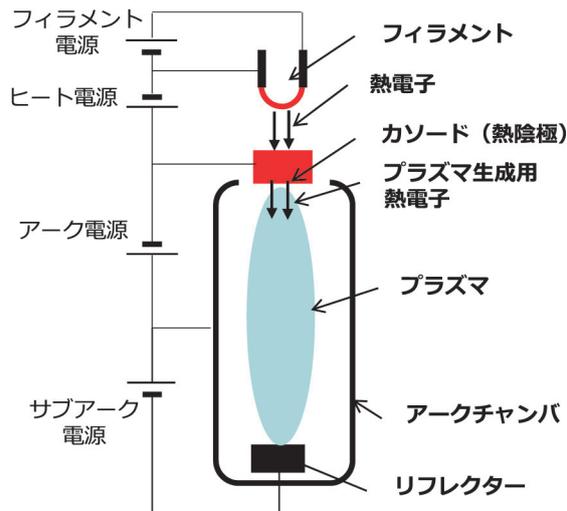
1990年代後半になると、6インチウェーハから8インチウェーハへの大口径化が模索され、2000年には300mmウェーハの半導体工場の初期投資建設が始まった。

これに対応するため、EXCEED2300Hを開発、市場投入した。EXCEED2300Hの開発は市場での主導権獲得のため、早期リリースを第一優先にし、EXCEED2000Aの単純なスケールアップによりなされた。しかし、注入面積が増加すると同一のビーム電流ではウェーハ枚数のスループットは減少する。これを同等にするには、イオンビーム量をウェーハ面積に比例して増加させる必要があった。ビーム量を増やしてもイオン源寿命は同等にする必要があった。そこで、それまで使用していたBernas-typeイオン源の電子リフレクター電圧を可変とし、最適な電離効率に制御できるBEAR (Bernas-t-type Electron Active Reflection) イオン源を開発した(図7-1)。プラズマフラッドガン (PFG) もフィラメント型から高周波型に変更し、電子放出口を1穴から5穴に増やすことによりフィラメント型に比べ低エネルギー電子供給能力の増大に加え、タングステン (W) のメタルコンタミ防止及び長寿命化を同時に達成した。

一方、300mmウェーハ微細化技術においては、運用検討されていたインジウムイオンが2001年に量産適用され、一価イオンで150keVの運用が求められた。当時、インジウムイオンの発生方法については量産適用できる安定した手法がなく競合各社で開発が行われたが、当社は三フッ化インジウムを使用した独自の発生手法でいち早く安定発生に成功した。またインジウム一価イオンを200keVまで輸送可能な分析能力を強化したビームライン開発が行われ、EXCEED2300Vがリリースされた。



7-1 BEAR (Bernas-type Electron Active Reflection) イオン源



7-2 IHC (Indirectly Heated Cathode) イオン源

図7 EXCEEDイオン源

(3) EXCEED3000AH、9600A

2003年、200mmウェーハ工場建設の設備投資は収束しはじめ、2005年以降になると300mmウェーハへの投資が主流となった。このころになると、デバイスの微細化による製造コストは大きく上昇し、各ユーザは製造コスト削減を装置メーカーにこれまで以上に強く要求するようになった。イオン注入機において、特に強く要求されたのはメカニカルスルーット向上と5keV-20keVの低エネルギー帯のビーム量改善であった。

EXCEED3000AHは前述のユーザから要求に対応するため、大幅な生産性向上がなされ、2003年にリリースされた。メカニカルスルーット向上では、真空側ロボットのハンド2本を独立に動けるように設計変更したG0型E/Sをリリースし、以降2006年までにG2型E/Sで450WPHにと継続的なスペックアップのための開発を行った。低エネルギービーム改善は、輸送効率低下の大きな原因であったビームスキャンマグネット (BSM) のギャップ高さを約1.5倍にすることで、 B^+ 10keVのイオンビーム量を250 μ Aから1200 μ Aと4倍強にUPさせた。

2007年には、一部のユーザから高価なハイエネルギー装置台数を圧縮し、そのバックアップとしても使用する目的で、EXCEEDの使用エネルギーを900keV以上にする要求が強まった。その要求に答えるため、一価イオンで320keV、三価イオンで960keVの注入が可能なEXCEED9600Aを登場させた。しかし、三価イオンの使用頻度が多くなり、高アーク電圧条件でのBEARイオン源の使用時間が増えてくると、スパッタ効果によるフィラメント寿命が問題となった。その

解決策としてIHC-R (Indirectly Heated Cathode type with electron active Reflection) イオン源 (図7-2) が開発され、イオン源寿命は大幅に延び、平均寿命は400時間から700時間となった。

(4) EXCEED3000AH-Evo/-Evo2

2009年のリーマンショック後の半導体市場は、まったく様相の違ったものとなった。それまで主役だったPC市場は減退の一途をたどり、スマートフォン市場が急成長し、アプリケーションプロセッサ (AP) とイメージセンサー製造メーカーおよびファングリーの投資が中心となった。これらのメーカー要求は、生産性よりも年々進行する微細化に対応する性能が強く求められた。その主な要求仕様であるパーティクルレス、メタルコンタミレス、高精度注入角度制御、パターン注入の機能を盛り込み、2010年、EXCEED3000AH-Evoがリリースされた。

パーティクル要求スペックは、注入前後で5~10個以下の増加しか許されず、管理粒径は65nm、45nm、32nmと年々小さくなる厳しいものだった。Evoシリーズでは真空側や大気側ロボットハンドのウェーハ接触箇所最小化などの継続的改善を行い、管理粒径32nm以上で10pc以下のパーティクルレベルを達成した。

メタルコンタミの要求レベルは全元素1ppm以下で、その対策はイオンビームの直接照射される可能性のある箇所、およびその二次粒子が照射される可能性がある箇所をカーボンで徹底的にカバーすることだった。

高精度角度注入に関しては、EXCEED3000AHで注入角度計測システムであるX-Yモニタがすでに搭載さ

れていたが、デバイス微細化の進行に伴い注入角度精度はそれまでの0.5°では不十分となり、0.1°の保証が必須となった。そこで、X-Yモニタでの計測結果をフィードバックし、注入角度を0.1°の精度で補正する垂直方向角度補正 (VICF) および水平方向角度補正 (HICF) が開発された。

一方、生産性向上の要求も依然としてあり、改善も継続して行われた。メカニカルスルーポットは高速スキャン軸採用により480WPHに引き上げられ、Vレンズの搭載により B^+10keV のイオンビーム量は1200 μA から1500 μA へと増加した。さらに、ロードロック開閉の影響やレジストのアウトガスによる真空復帰時間を短縮し、実効生産性向上するため、E/Sにクライオポンプを1台増強したEXCEED3000AH-Evo2シリーズもリリースされた。

(5) BeyEX (Beyond EXCEED)

2014年以降、最先端デバイスで微細化技術が限界に近づいてくると、他プロセスのパラツキをPIシステムで補正する工程を量産で使用する試みがなされるようになった。それまで搭載されていたPIシステムはリング状パターンを実現するためにステップ注入を行う必要があり、そのスルーポットの低さが問題視されるようになる。また、通常注入での生産性向上やパーティクルレス、メタルコンタミレスの要求もさらに厳しくなった。2015年、これらの要求に対するソリューションとこれまで蓄積してきた技術をすべて盛り込んだBeyEX (Beyond EXCEED) をリリースした。

新技術として、マグネットの鉄心を樹脂でコーティングしたCast-BSMが搭載され、鉄心の真空中での露出を防ぐことによってFeコンタミフリーを実現できるだけでなく、真空内容積やユニットサイズも小さくできた。

PIシステムは、それまでのメカスキャン軸だけの制御でなく、任意のウェーハ注入位置で異なった磁場スイープを制御するBSMコイル電流波形設定できるようにしたSuper-PIシステムを搭載し、PIシステムに比べ複雑且つ精度の良いパターンニング注入が可能になった (図8)。

低エネルギービームUPでは、BSMとCOL部間のMuffチャンバに永久磁石による収束レンズを組み込んだMuff-Magnetを搭載することで、 B^+10keV イオンビーム量を2000 μA まで引き上げている。

また、パーティクル管理レベルとして、粒径32nm以上で5pc以下の特に厳しい要求のあるユーザに対しメカスキャン軸の軸受け構造を改良したりニアスライドスキャン軸を特別オプションとして設けている。

BeyEXは、今後も微細化をつづけるユーザの技術要求に対応した新提案を行って改善していく。

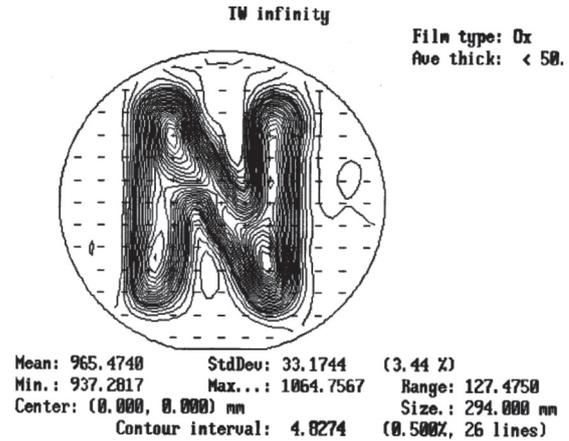


図8 Super PI注入マップ (N描画)

2. 2. 4 SiCパワーデバイス向けIMPHEAT⁽⁵⁾

半導体素材としてのシリコンカーバイド (SiC) は、高電圧や高温に高い耐性を持つことで1950年代から知られていたが、良質なウェーハ製作がSiに比べ困難であった。

2000年以降は省エネルギーへの要請が高まり、SiCパワー半導体の注目度が急速に高まった。2008年以降、6インチ-SiCウェーハ製造の可能性が出てくると、市場の主導権を握ろうと製造メーカの4インチSiCウェーハのパイロットラインへ投資が活発化した。しかし、SiCデバイス作成上で必須な装置性能である大電流アルミニウム (Al) イオンの安定発生と500°C以上で加熱したSiCウェーハの注入・搬送技術は、量産では使えないものだった。

当社は、早期参入における優位性獲得のため、2009年に世界初となる量産適用の4インチ-SiC用イオン注入装置 (IMPHEAT) をリリースした (図9)。

Alイオンビームの発生にはこれまで塩化アルミ (AlCl₃) やフッ化アルミ (AlF₃) 等の固体材料を蒸発させイオン化することでビームを発生していたが、安定したビーム発生に問題があった。IMPHEATではIHC-Rイオン源のプラズマ発生室内にスパッタ材としてアルミ化合物 (AlN) を置き、プラズマ発生のサポートガスとしてハロゲンガス (PF₃) を使用することで化学反応とスパッタ効果を利用する方法を選択した。この方法ではAl固体を使用した場合に比べ、周辺部材へのAl付着が比較的少なく大電流Alイオンビームを長時間、安定に発生することができた。

高温注入・搬送技術としては高温静電チャック (高温ESC) の開発が必須であった。それはウェーハを効率よく高温にし、かつ搬送するため高温ウェーハステージにウェーハを密着させる必要があったためである。SiCウェーハプロセスでは500~800°Cでの処理



図9 IMPHEAT

が要求されていたため、それまで一般的に利用してきた高温ESCの材料のアルミナ (Al_2O_3) やシリコンカーバイド (SiC) は必要な吸着力を得られなかったため、新たにPBNを誘電層としたヒーター内臓のPBN-ESCを開発・採用した。PBNは、気相成長法 (CVD法) によってつくられた窒化ホウ素 (BN) で化学的安定性が高く、高温での安定した絶縁性を有する。これにより500℃でSiCウェーハをイオン注入機で処理できるようになった。2010年にはNEDOの開発プロジェクトに参画し6インチ-SiCウェーハの搬送システムを完成させた。

SiCパワー半導体市場は、今後2020年に向けて大きく成長が期待される市場である。現在SiC用量産イオン注入装置として主導権を握っている状況であり、今後もこれを保持し、本格化する6インチSiCウェーハ市場でメインサプライヤーとしての地位を確立するため、改善・開発をユーザの要求に答えながら進めていく。

2. 2. 5 大電流PRシリーズ及びEXCEED8000⁽⁶⁾

(1) 大電流装置と大電流プロセスの歴史

大電流装置はトランジスタのソース・ドレイン・ゲート電極形成プロセスを従来の熱拡散法に代わって、イオン注入で $1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ センチメートル以上の高ドーズ注入し、その後熱アニールにより結晶損傷回復とドーパントの活性化によって、デバイスの性能のバラツキを抑制し歩留まり改善を実現するプレデポジションプロセスにまず適用された。本プロセスは「イオン注入でもできる」から、「イオン注入でないとできない」キラープロセスとなり、中電流装置に続いて大電流装置も本格的に求められるようになった。現在もイオン注入装置の最大市場となっており、各社の競争が最も激しい市場でもある。

大電流装置は、中電流とは異なり高ドーズ領域で

10mA近くの高ビーム電流で注入を行うため、ビームの空間電荷効果、ウェーハの温度上昇とデバイスのチャージアップ破壊現象が課題あった。

空間電荷効果は、イオンビームの正の電荷によりイオンどうしが反発してビーム径が大きくなる現象で、中電流機で使われている静電スイープ方式ではビームをコントロールすることが難しく、良い注入均一性を得るのが困難であった。

ウェーハ温度は、ビームエネルギーと熱放散とのバランスで決まるが、真空中では熱伝導が低下し輻射による放散のみとなる。 $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 以上のドーズ量では、ウェーハ温度は容易に100℃に達する。ウェーハに塗布されるレジストの熱変形温度は120℃なのでそれ以下に温度上昇を抑えなければならない。

上記2点の問題の解決には、回転ディスクのメカニカルスキャン=バッチ方式が導入技術に含まれていた。更に高速回転の遠心力は、ウェーハを水冷ディスクに押し付けるので熱伝導冷却性能の強化を図ることができた。

また、デバイスのチャージアップ破壊は、薄い酸化膜で絶縁されているゲート電極に注入する高ドーズ注入で特に問題になった。本課題については低エネルギーの電子を十分に供給することが重要で有り、電子シャワーやプラズマフラッドガン (PFG) の搭載およびビーム電流密度制御で解決を行った。以下に大電流装置の開発と問題解決の経緯を紹介する。

(2) PR-80/80Aシリーズ

図10は、当社が6インチウェーハ用に開発した大電流装置PR-80シリーズである。エンドステーションにデュアルディスクとベルト搬送システムを採用した。さらに、より高速・安定した搬送が可能なロボット搬送システムを採用し、コストパフォーマンス改善のためシングルディスク方式を採用したのがPR-80A



8711③

図10 PR80シリーズ

である。

チャージアップによる素子破壊は、ビームの形状及びその電流密度分布に敏感で有り、高安定な素子の歩留まりを得るためにはこれらのパラメータを日々一定に保つ必要がある。PR-80Aではチャージアップ破壊抑制にそれまでの「エレクトロンシャワーシステム」に加え、ビームサイズを自動制御する「定形状ビーム発生システム」を開発、搭載した。本システムによりチャージアップ破壊抑制性能が大幅に向上した。

(3) EXCEED8000

EXCEED8000はウェーハサイズの8インチ化の要求に応じて開発された装置である(図11)。ウェーハ処理速度を6インチウェーハと同等にするため8インチウェーハを13枚載できる大型高速回転ディスクを備えている。イオン源はイオンビーム電流量アップのために開発されたECRイオン源が搭載された。BF₂ビーム電流30mA、As/Pビーム電流15mAと従来の約2倍のビーム電流量が得られ、イオン源寿命も2倍以上に改善した。

図12は、チャージアップ対策の「PID型プラズマラッドガン(PFG)システム」である。PFGからプラズマ電子を直接ビームに供給してウェーハのチャージアップを緩和する。ウェーハ上のデバイスがチャージアップすればPFGプラズマから自律的に電子を供給するので、電子過多によるチャージアップ現象が起きないように低エネルギー電子を供給させるシステムである。このように十分なPFG電流を供給できる状態であるかをウェーハ注入前に監視・モニタするシステムを合わせて開発した。本チャージ緩和システムは、更に改良されEXCEED2000シリーズに適用された。また、ECRイオン源開発の経験はEXCEED3000シリーズのRF-PFG等に生かされ、チャージ緩和モニタシステムと合わせて他社に先駆けたチャージ緩和技術として成功を取めた。

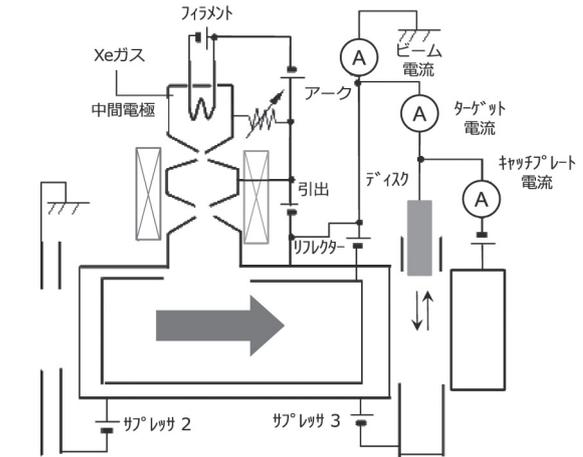


図12 PID型PFGシステム

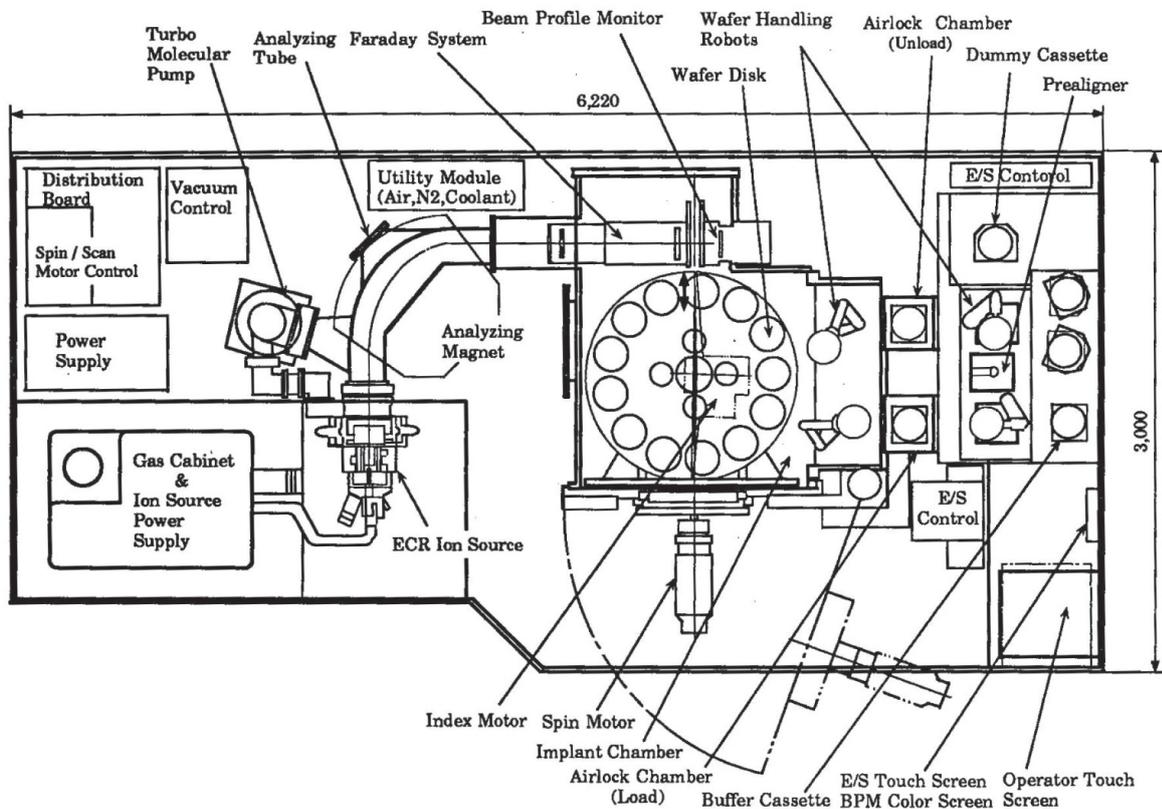


図11 EX8000 概略図

2. 2. 6 クラスターイオン注入装置CLARIS⁽⁷⁾

90nmノード以降のCMOS半導体素子製造におけるイオン注入の課題としてはデバイスの微細化に伴うソース/ドレイン領域の極浅接合形成における生産性及び信頼性であった。特にエクステンションと呼ばれる接合部の形成ではホウ素イオンの注入エネルギーは1keV以下でmA級のビーム電流、且つ0.5度以下の低発散ビームが要求された。一方このようなエネルギー領域では、エネルギーの低下に伴い急速にビーム電流が減少、発散する。これは空間電荷効果と呼ばれるビーム発散力の増大によって起こる自然現象であり、当時の大電流イオン注入装置の課題であった。

この課題を解決する手法としてデカボラン ($B_{10}H_{14}$) (図13) に代表される多原子分子を使用したクラスターイオン注入が提唱された。例えばデカボランイオンビームを用いれば、ホウ素イオンに比べて約10倍のエネルギー、約1/10のビーム電流量で、等価的な注入が可能である。1996年のイオン注入に関する国際会議で、京都大学の山田教授グループがこの技術の原理的可能性を公表し、当時技術者の大きな関心を喚起した。当社は山田教授指導の下、2002年2月に科学技術振興事業団と「デカボランイオンビーム発生装置」に関する開発委託契約を締結、ビーム発生基礎技術の開発に成功した。その後量産装置を開発するためオクタデカボラン ($B_{18}H_X^+$) ビーム発生技術を開発していたSemEquip社 (現在の米国開発拠点NIUSA MAの前身) と共同プロジェクトを2005年より開始、2008年にリリースを行った。

$B_{18}H_X^+$ イオンを使用した場合、最大で等価エネルギー3keV (イオンエネルギーでは60keV)、デカボランでは7keVの注入が可能である。イオン化に際して分子を壊しにくい電子衝撃によってイオン化するイオン源を搭載し、 $B_{18}H_{22}$ を使用した場合等価的に1keV

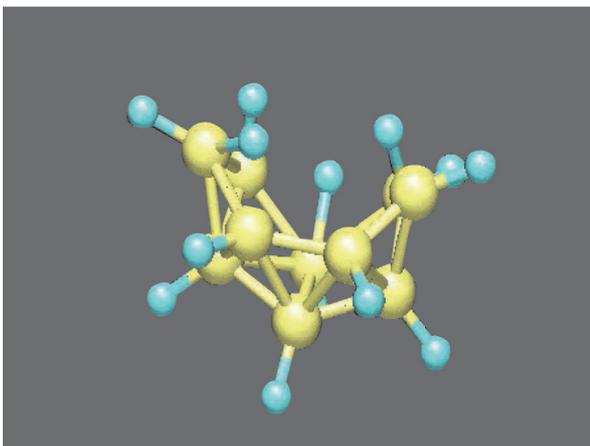


図13 クラスターイオン (デカボラン)

で30mA以上のボロンビームがイオン源より発生可能である。オクタデカボラン等の材料は常温では固体であるため、材料を加熱してガス化しイオン源に供給するシステムを搭載している。またビーム発生時にイオン源に絶縁性堆積物が生じるため、 NF_3 リモートプラズマによるクリーニングシステムが搭載され、運転時間に応じて自動的にクリーニングが可能である。イオンを輸送するビームラインはEXCEEDシリーズとほぼ同等の構成を持つ。エクステンションで典型的なエネルギーであるボロン500eVの注入において本装置は最大6mAの等価の大電流で精密な注入可能である。第2世代の装置は新たに $C_7H_X^+$ に代表されるカーボンクラスターの発生機能を具備し、2008年に国内のロジックメーカーの開発ラインに納入された。

3. FPD用イオン注入装置の技術の系譜

3. 1 FPDへのイオン注入技術の導入

TV、PCモニターやスマートフォンなど多数の家電製品に薄型ディスプレイ (Flat Panel Display: FPD) が使用されている。

FPDは、ガラス板の内側に様々な微細加工が施された2枚の薄いガラス板が貼り合わせられて造られているのだが、ディスプレイをうずめる画素の点灯は、各画素や画素領域の周辺部に大量に形成された μm サイズの薄膜トランジスタ (Thin Film Transistor: TFT) によって電気信号で制御されており、これらTFTの電気特性改善の為にシリコン基板などの半導体製造で広く使われるイオン注入技術が、FPD製造でも使用されている。

現在のFPD用イオン注入装置は、最大1500mm×1850mm□ (厚さ0.4mm) の基板サイズに対して、表面から数十nmの深さに $1 \times 10^{11} \sim 1 \times 10^{15}/cm^2$ のリン (Phosphorus) あるいはボロン (Boron) を均一に注入する装置である。現在までに発売してきた装置及び性能の推移を年代毎にまとめたものを表2に示す。

3. 2 FPD用イオン注入装置の歴史と技術の推移

3. 2. 1 G1~G2.5 世代対応 IDPシリーズ⁽⁸⁾

1980年代後半、当時の半導体製造用のイオン注入装置で処理できる基板サイズは6インチ ϕ 程度であり、FPD製造用に使用される大型ガラス基板への技術利用はコストや処理能力の点で困難であった。この点を解決する為、基板の全域を覆う円形で均一なビームで注入する方式が考案され、松下電器産業株式会社 (現、パナソニック株式会社) 中央研究所と日新電機との共同装置開発を開始、製品開発の後、1990年に研究用装置ID-100の1号機を納入した。本装置が世界で初めて納入されたFPD用イオン注入装置である。

表2 FPD用イオン注入装置の性能推移

項目		年	1990	1995	2000	2005	2010	2015
装置型式 基板サイズ	ID-100 ~300mm × 400mm□		■					
	IDPシリーズ ~400 × 500 mm□		■	■				
	ID6700 ~600 × 720 mm□			■	■	■		
	G4 ~730 × 920 mm□					■		
	iG4 ~730 × 920 mm□					■	■	■
	iG5 ~1300 × 1500 mm□						■	■
	iG6 ~1500 × 1850 mm□						■	■
注入方式	円形ビーム+基板回転		■					
	ラインビーム+基板走査			■	■	■	■	■
搬送方式	2チャンバ		■					
	4チャンバ		■	■				
	2チャンバ+ 2プラテン			■	■	■		
	4チャンバ+ 2プラテン					■	■	■
質量分離	無し		■	■	■	■		
	有り					■	■	■
最大処理能力	2.4m ² /H (20枚/H)		■	■				
	6.0m ² /H (30枚/H)			■	■			
	21.6m ² /H (50枚/H)				■	■		
	57.1m ² /H (80枚/H)					■	■	■
	166.5m ² /H (60枚/H)						■	■

ID-100の装置外観を図14に示す。

ID-100の仕様は、基板サイズ300mm×300mm□、イオンの最大加速電圧100kV、チャンバ構成は、イオン注入する処理室とロードロック室の2室から成り、ガラス基板は、ロードロック室前のホルダに手置きされ、ロードロック室内に組込まれた搬送ロボットが基板を搬送し、ロードロック室での真空排気を経て、高真空中に保持された処理室に投入された。

従来のイオン注入装置では、単孔電極から発生したイオンビームを質量分離マグネットに通過させて所望のイオンを取出し、ビームと基板を走査して注入するが、本装置は、多孔電極を用いてプラズマ生成室で発生した全てのイオンをシャワー状に注入することから、従来装置と区別してイオンドーピング装置と命名された。当社は1993年に「イオンドーピング」を商標登録している。

1990年代半ば、複数台の研究用イオンドーピング装置の納入を終え、生産技術として世の中に認知されるようになってきた頃、生産機の開発に着手する。生産機では、ガラス基板を数mm幅で多段に配置したカセットから自動で取出しかつ高速で処理する必要があった。

処理能力を向上する為、チャンバ構成は、処理室、搬送室およびロードロック2室の4室構成を採用し、各チャンバでそれぞれ注入、真空中の基板搬送、真空



図14 ID-100 装置外観

排気と大気ベントの動作を分割した。また、生産時に問題となるパーティクル（粒径1μm以上）が基板に付着することを防ぐ為、注入時の基板方向は垂直に変更された。搬送時間だけでなく注入時間も短縮する目的で、高周波電力の出力を上げることによってイオンビーム電流量を約2倍に増加させることにも成功した。本構成で、最大処理能力は、25枚/H以上が得られ、装置寸法は3.8m (W) × 6.3m (D) × 2.2m (H)、重量は12tであった。後に、真空搬送ロボットを2基搭載することで、最大処理能力を50枚/H以上に改良した装置も開発している。

当時、イオンドーピング装置を使ったFPDの生産が開始され、試作目的を含めて多数のメーカーに本生産機を納入、初めて海外（韓国）向けも含まれた。

一方、FPDの大量生産における画素部のTFT製造プロセスは、成膜とエッチングの組合せにより製造される非晶質シリコン（amorphous silicon, a-Si）が主流となっており、イオンドーピング装置は使用されなかった。

イオンドーピング装置は、電子移動度が高い多結晶シリコン（poly silicon, p-Si）のTFT製造プロセスに使用され、a-Si TFTのFPDでは後付される画素駆動回路の組み込みやTFTを小型化できることから、ディスプレイを小型高精細化／低消費電力化できる特徴があったが製造コストが高い課題が残っていた。

a-Si FPDの生産は、TVやPC向けに軌道に乗り、1枚当たりの取り数を増やす為、基板サイズの大型化が始まっていた。以降、p-Si FPDの生産は、a-Si FPDの基板サイズの後を追うようになる。将来の事業発展への期待から、イオンドーピング装置が、研究開発本部からイオン機器事業部へ事業移管されたのがこの時期である。そしてついに競合メーカーが現れたのもこの頃である。

3. 2. 2 G3.5 世代対応 ID6700⁽⁹⁾

1990年代後半、a-Si生産の基板サイズは600mm×720mm□程度まで大型化され、イオンドーピング装置も同サイズの対応が求められるようになったが、従来の注入方式では、円形ビームの面積が2倍を超えてしまい、製作自体が困難であった。これを解決する為、基板の短軸方向を覆うラインビームを発生させ基板の長軸方向に基板を走査して注入する方式に変更、装

置全体の構成も大きく見直した。

プラズマ生成は、高周波放電方式からプラズマチャンバーに設置された3本のフィラメントによるアーク放電方式に変更することで、ラインビーム全体の電流量と短軸方向の均一性を制御できるようにした。イオン源と注入方式を図15に示す。

ビーム計測機構として、基板位置の後方にプロファイルモニタと呼ぶ多点のファラデーカップが均等に配置された。プロファイルモニタは、基板走査中を除いて常時ビームを計測しており、本装置は、イオン源のフィラメント電流を、定められたロジックに従ってフィードバック制御し、ビームの電流値と均一性を設定範囲内に保っている。

チャンバ構成は、装置を小型化する目的で、処理室とロードロック室の2室とし、処理能力が下がらないようにチャンバ間の基板交換を2枚単位で行い、また注入処理も処理室内に2対のプラテンを採用し交互にスキャンした。

本構成で、最大処理能力は、50枚/H以上が得られ、製品名はID6700と命名された。装置寸法は4.0m(W)×6.5m(D)×2.6m(H)、重量は18tであった。

しかしながら、新方式のラインビームでは、円形ビームと同じビーム電流量を得る場合、密度比で10倍を超える能力が必要であった。この為、イオンビーム出力の変動、装置内部の汚れ、基板表面の静電気の発生など、多数の問題が発生し、この解決に時間を要した。イオン注入を使う低温p-Si生産は順調に伸びていたものの、半導体やa-Siと比較すると僅かなマーケット規模に留まっていた。納入先は、日本、韓国に続き、初めて台湾へも納入した。

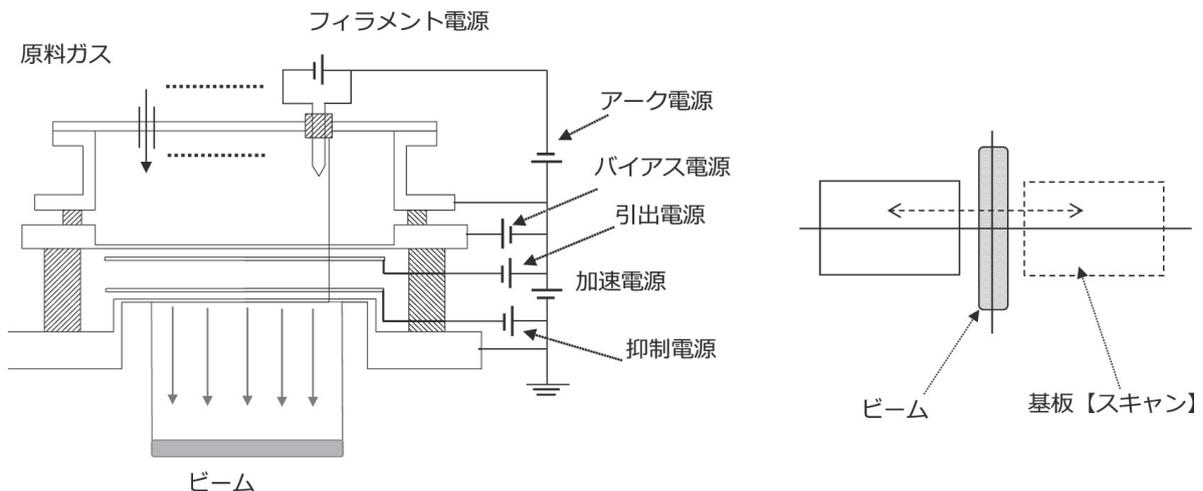


図15 ID6700 イオン源、注入方式

3. 2. 3 G4.5 世代対応 iG4/G4⁽⁹⁾

2000年に入り、730mm×920mm□(G4.5世代)での生産が計画され始め、装置コンペも開始された。これを機に、当社は質量分離機能を搭載した装置開発に着手する。

プラズマ生成部はID6700では3本であったフィラメントを6本に増やし730mm幅のラインビームを発生、当時としては、画期的な発想であったギャップ長800mmにも達するマグネットにこのビームを通過させ、ラインビーム全体を質量分離した。製品名はiG4と命名され、2002年に社内評価機を完成させた。iG4システム構成を図16に示す。

その他の基本概念は、チャンバ間の2枚単位の基板交換、2対のプラテン処理、プロファイルモニタによるビーム計測などID6700を踏襲しており、2枚単位の基板交換を実現するため、自社で4軸真空ロボットを開発した。

チャンバ構成は、4室構成を採用することで、最大処理能力は、80枚/H以上が得られた。730mm×920mm□の生産ラインから、ほとんどの顧客が、ローダ(カセットと大気搬送ロボットの機能)を自社調達し現地でドッキングされることになった為、装置寸法はローダを除き5.0m(W)×8.2m(D)×3.0m(H)、重量は36tであった。

iG4は所望のイオンのみを注入することができるため、注入精度を飛躍的に改善することができたが大電流は得ることができず、注入量の多い工程では採用されなかった。従って当社では、iG4と同時期にイオンドーピング装置G4を開発している。

730mm×920mm□装置供給では他社に出遅れた当社だが、iG4社内評価機を使い、徐々にデータ、ノウハウ、信頼を積み重ね、2003年にiG4 1号機を納入した。

生産技術は、a-Siは、大型画面が製品対象になったことから基板サイズがG5、G6、G7と拡大していったが、低温p-Siは、小型高精細画面が製品対象であり大型化に技術的な課題があったこと、また携帯電話は

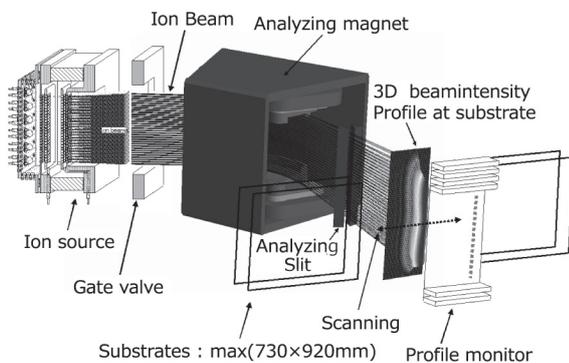


図16 iG4 システム構成

メーカーごとのモデルチェンジが激しく大型化による大量生産に不向きであったことから10年近くG4.5が続くことになる。この間、競合他社の中には生産装置としての安定稼働に苦戦し、シェア低下させる一方で当社はiG4のビーム量や稼働時間などの改善を進めて製品供給を続け、FPDイオン注入装置のトップシェアを取り戻すことができた。

この時期、新たなFPD製品としてOLED(有機発光ダイオード)使ったディスプレイが登場し、生産が開始された。OLEDは、LCDよりも高画質化が期待され、発光を制御するTFTの信頼性向上の為にイオン注入が不可欠とされた。

3. 2. 4 G5.5~6 世代対応 iG5/iG6⁽¹⁰⁾

2000年代後半、この頃市場に登場していたスマートフォンは、画面構成をソフトウェアで作成できることから同一仕様のFPDの大量需要を生み出し、G4.5では生産が追い付かなくなり、ついに1300mm×1500mm□(G5.5世代)での生産が計画され始めた。

当時、G5.5対応のイオン注入装置はこの世に存在しなかったが、トップシェアの実績と信頼から当社に製作が依頼され、2011年にG5.5対応のiG5を納入、また、同年に1500mm×1800mm□(G6世代)対応のiG6を納入する。iG6の外観図を図17に示す。

基本的な装置構成はiG4を踏襲し、1500mmのビームを発生する為にフィラメントは10本に増やされた。ただし、質量分離マグネットは、単にスケールアップすると単体で38tになる為、巨大なポールを使わない構造に変更し、質量をおよそ27トンと大幅な軽量化に成功している。本構成で、最大処理能力は、60枚/H以上と数値ではiG4より劣るが、基板サイズ換算した最大処理能力は、iG5が2.9倍、iG6が4.1倍になる。装置寸法はiG5が7.5m(W)×12.5m(D)×3.0m(H)、重量は102t、同iG6が8.4m(W)×13.0m(D)×3.0m(H)、重量は112tであった。

100tを超える装置を受注生産し、試作機無しに完成させて工場で安定稼働させるには、間違いの無い開発設計はもとより、納入後に発覚する不具合への短期間の対応が重要となる。当社はこの課題を適切に対処し、今ではG5.5サイズ以降の装置に関して100台近い納入実績と90%を超えるマーケットシェアを持つに至っている。

世界で初めて当社で製作されたイオンドーピング装置は、約20年を費やして一事業として成り立ち、近く開発開始から30年が経とうとしている。低温p-Si LCDやOELDは、緩やかではあるが市場の拡大が続く見通しだが基板サイズ拡大などの処理能力向上に対応してゆく必要がある。



図17 iG6 装置外観

当社のFPD事業は、2005年に開業した滋賀事業所に開発、設計、組立、アフタサービスなどの関連部門を集約しており、装置の品質向上と事業継続に努力していく。

4. むすび

1973年にイオン注入の技術が導入された後、日新イオン機器株式会社の設立を通じて数多くのイオン注入装置を開発、リリースしてきた。半導体デバイスは継続して高集積化、高性能化が行われており、イオン注入が適用されはじめた頃のMOSFETの構造から、近年では3次元トランジスタで構成されるデバイス構造に大きく進化している。また昨今のスマートフォンの需要拡大及びディスプレイの高精細化要求により、低温ポリシリコン型及びOLED型ディスプレイの製造におけるイオン注入技術はさらに重要なものになってきている。これに伴いイオン注入に要求される技術、性能は日々要求が厳しくなっており、このような顧客の要求に応えるべく最先端デバイスにも対応可能な装置開発を今後も継続、リ

リースを行っていき、イオン注入装置事業の発展を目指す所存である。

参考文献

- (1) M.I. Current, et al, in Characterization and Metrology for ULSI Technology, AIP Proc. 449 (1998), pp143-151
- (2) 大西 他,「イオン注入装置の進歩と将来」日新電機技報 Vol.35, No.2, (1990.3), pp2-8
- (3) 佐々木 他,「生産用高エネルギーイオン注入装置“NH-50SR”」日新電機技報 Vol.39, No.3, (1994.11), pp31-36
- (4) 丹上 他,「イオン注入機の歴史と当社の取り組み」日新電機技報 Vol.54, No.2, (2009.10), pp32-42
- (5) 飛川 他,「SiCパワーデバイス用イオン注入装置IMPHEATの開発」日新電機技報 Vol.58, No.2, (2013.10), pp36-40
- (6) 内藤 他,「大電流イオン注入装置“EXCEED 8000”」日新電機技報 Vol.39, No.3, (1994.11), pp24-30
- (7) 濱本 他,「新型クラスターイオン注入装置“CLARIS”の開発」日新電機技報 Vol.54, No.2, (2009.10), pp50-56
- (8) 立道 他,「イオンドーピング装置」日新電機技報 Vol.39, No.3, (1994.11), pp52-58
- (9) 立道 他,「イオンドーピング装置の歴史と当社の取り組み」日新電機技報 Vol.54, No.2, (2009.10), pp43-49
- (10) 松本 他,「第5.5世代液晶向けイオンドーピング装置の開発」日新電機技報 Vol.56, No.2, (2011.11), pp55-59

執筆紹介



内藤 勝男 Masao Naito
日新イオン機器株式会社
常務執行役員



山下 貴敏 Takatoshi Yamashita
日新イオン機器株式会社
I/I事業センター長



丹上 正安 Masayasu Tanjyo
日新イオン機器株式会社
I/I事業センター



小西 正志 Masashi Konishi
日新イオン機器株式会社
FPD装置事業センター長



奥手 康弘 Yasuhiro Okute
日新イオン機器株式会社
FPD装置事業センター
営業技術グループ長



濱本 成顕 Nariaki Hamamoto
日新イオン機器株式会社
新技術開発プロジェクト室長