

大電流イオン打込み装置

High Current Ion Implanters

バイポーラトランジスタのベースやエミッタ及びMOSFETのソースやドレインなどのように、 10^{15} から $10^{16}/\text{cm}^2$ の高濃度不純物導入を必要とする半導体素子の量産に使える大電流イオン打込み装置を開発した。

従来の打込み装置を大電流化する場合の問題点はイオン源にあったため、全く新しい方式の、磁場中のマイクロ波放電を使ったイオン源を開発することにより、長時間安定に10mA前後のイオン電流で打ち込むことが可能になった。トランジスタ製造工場の生産設備として、打込み装置試作を行ない、歩留まり向上及びトランジスタの性能向上に寄与することができた。また、これをもとに打込み装置の製品化を行なった。

作道訓之* *Noriyuki Sakudō*
 登木口克己** *Katsumi Tokiguchi*
 小池英己** *Hidemi Koike*
 岡田修身* *Osami Okada*
 田谷俊陸*** *Shunroku Taya*

1 緒言

イオン打込み技術は不純物量を電荷量で制御できるので、均一性、再現性に優れ、かつ 10^{10} ~ $10^{16}/\text{cm}^2$ と広範囲に制御できる利点をもっている。しかし、実際にこの技術が半導体素子製作に使われ始めたのは昭和45年ごろのことであり、その後、打込みウェーハの処理プロセスと打込み装置技術の発展により、現在ではイオン打込みを抜きにした半導体プロセスは考えられない状況にまでなってきた。

実用化初期では、市販されている装置の大部分が打込み電流、数マイクロアンペアから数十マイクロアンペア程度の小電流のものであった。したがって、バイポーラトランジスタのエミッタやMOSFET(電界効果トランジスタ)のソースやドレインのように、 $10^{16}/\text{cm}^2$ 程度の高濃度領域を打込みで作ることは実用的に難しく、ミリアンペアオーダーで打込みができる、大電流イオン打込み装置の開発が望まれていた。

従来の打込み装置を大電流化する場合の問題点の一つは、イオン源にあった。従来のイオン打込み装置用イオン源は、熱フィラメントを使っていたため、電流を増やそうとするとフィラメントの寿命が短くなるという欠点があった。

2 マイクロ波イオン源の開発

2.1 基礎技術の蓄積

このような状況のもとで、日立製作所では昭和47年から、磁場中のマイクロ波放電を利用した大電流イオン源の開発に着手した。同軸形のマイクロ波イオン源を作り、種々の条件での実験を重ねるうち、磁場強度が電子サイクロトロン共鳴条件(2.45GHzの場合890G)以上のところで、いわゆるWhistlerモードの波としてマイクロ波を伝搬吸収させることにより、極めて高密度($10^{12}/\text{cm}^3$)のプラズマを発生できることを見いだした。またこのプラズマから多孔レンズにより、直径40mmのイオンビームを引き出し、連続的に400mAのイオン電流を安定に得た¹⁾。このようなイオン化の方式は、熱フィラメントを用いていないために、従来のものに比べて格段に寿命が長く、かつ大電流イオンビームを引き出すのに適していることが分かった。

2.2 打込み装置用イオン源への発展

大電流イオン打込み装置用イオン源は、磁場形の質量分離

器と結合させる必要上、イオンをスリット状の引出し孔から短冊状のビームとして引き出すものでなければならない。そのためは、引出し孔形状に近い断面形状の、均一なプラズマからビームを引き出すのが最も効率が良い。

このため、図1に示すようリッジ導波管タイプの放電箱を基本としたイオン源を開発した²⁾。この放電箱の部分をソレノイドコイルの中に置き、磁場中のマイクロ波放電により、発生したプラズマからイオンを引き出すものである。図2の断面図に示すように、放電電極間以外の空間に窒化ボロンなどの誘電体を充填することにより、放電領域にだけプラズマを発生することができる。また、一般にリッジ導波管の特徴としてリッジ間には均一なマイクロ波電界が生じるから、基本的に同じ構造をもつ上記放電箱の放電電極間には均一なマイクロ波電界が生じ、発生するプラズマの均一性も良い。したがって、このプラズマからスリットを通してイオンビームを引き出した場合、エミッタンスの小さいビームとなり、イオン源からターゲット室までの間に介在する質量分離器などのビーム輸送系での透過率を上げることができる。

図3にプラズマからイオンをビームとして引き出す様子を示す。イオン引出し電極系は3段のピアス形である。負電極には-2kVの電圧が印加される。これは引き出されたイオンビームと、ビーム輸送系中の残留気体分子や器壁との衝突で発生した二次電子が、イオン源の中に吸い込まれるのを阻止するためである。

一般に、大電流の荷電粒子ビームは、自分自身の電荷による反発力のため発散してしまうことが知られている。そして、エネルギーが小さいほど、また荷電粒子の質量対電荷比が大きいほどその効果が大きい。しかし、ビーム輸送系で二次電子を十分に発生させ、イオンビーム中にその二次電子が取り込まれてイオンの電荷を中和する条件がある場合には、ビームの発散を防止できる。イオン引出し電極系に上述のような負電極を用いる理由は、イオンビームの電荷を中和している二次電子を保存しておくためである。

また、上記放電箱に効率良くマイクロ波を導入するための導波管回路や真空封止法にも工夫を加えることにより、従来になく安定で長寿命な、打込み機用大電流イオン源を実現す

* 日立製作所中央研究所 工学博士 ** 日立製作所中央研究所 *** 日立製作所那珂工場 理学博士

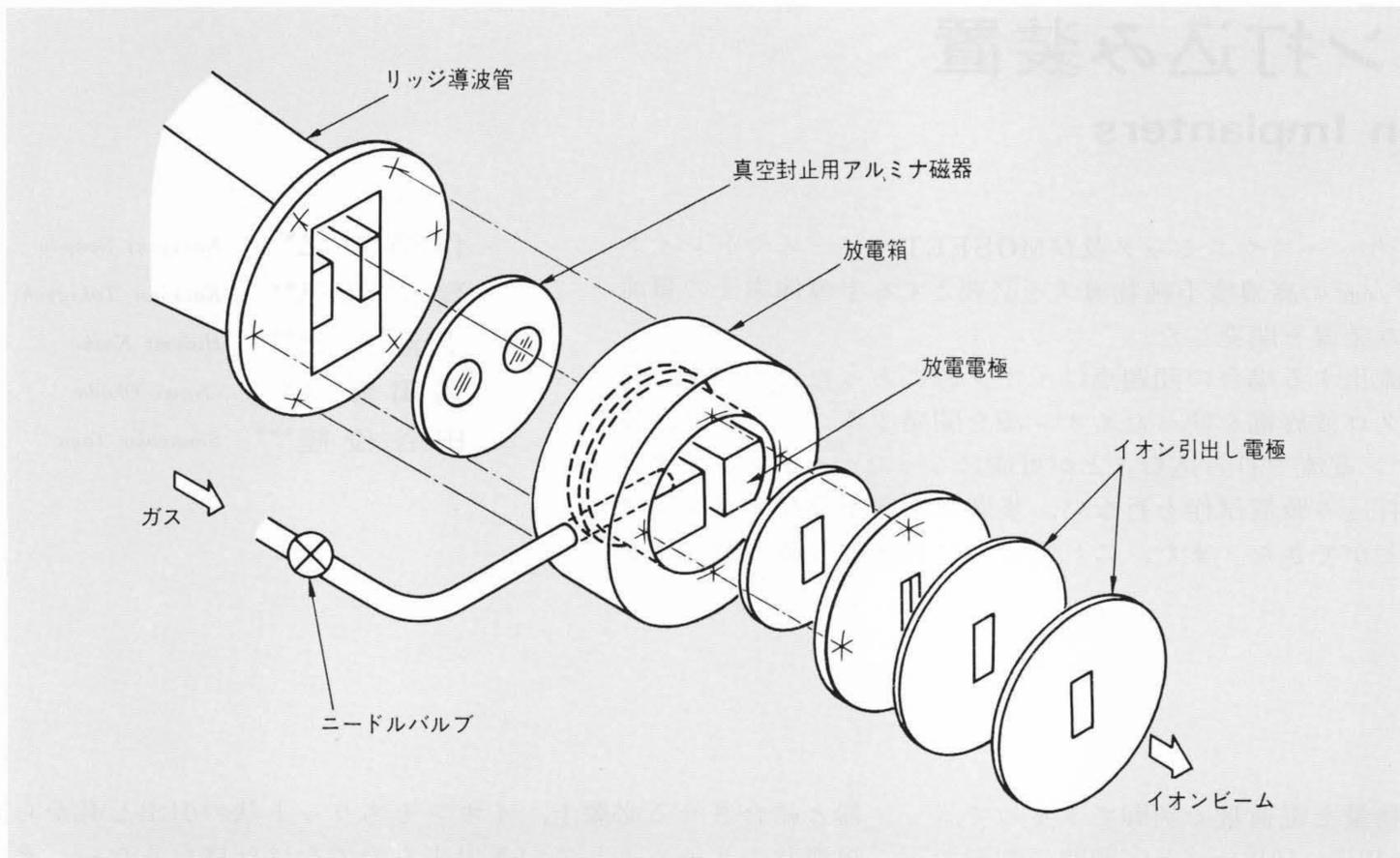


図1 イオン打込み装置用マイクロ波イオン源
マイクロ波はリッジ導波管を通り、真空封止用アルミナ磁器を通して放電箱へ入る。放電電極間には均一な高周波電界があるため、均一なプラズマが発生する。

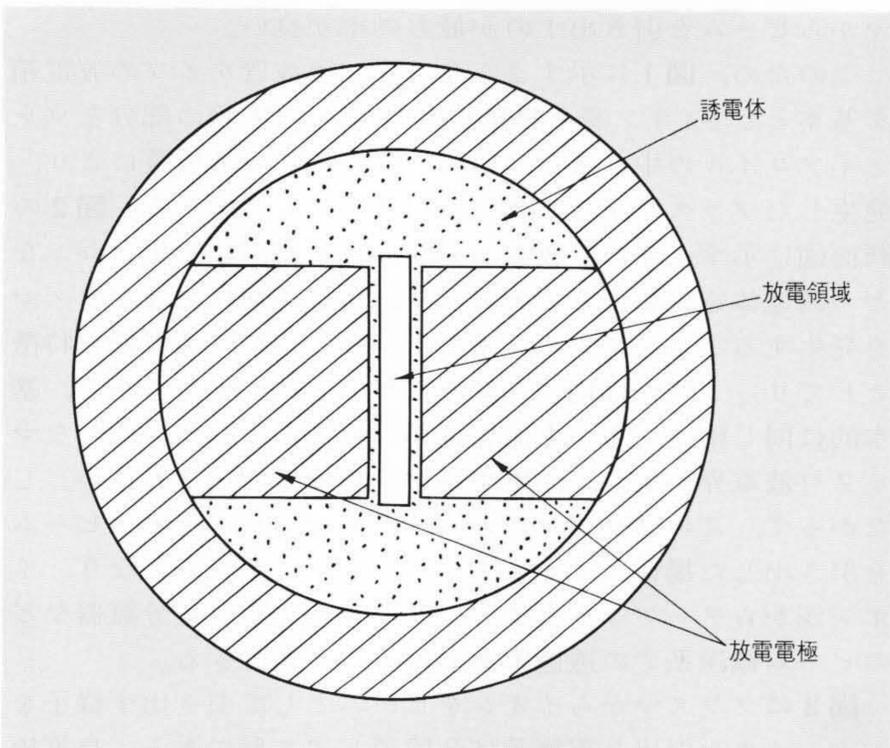


図2 マイクロ波イオン源放電箱断面図 放電電極の間の空間だけにプラズマを発生させるため、その他の部分には窒化ボロンなどの誘電体を充填している。

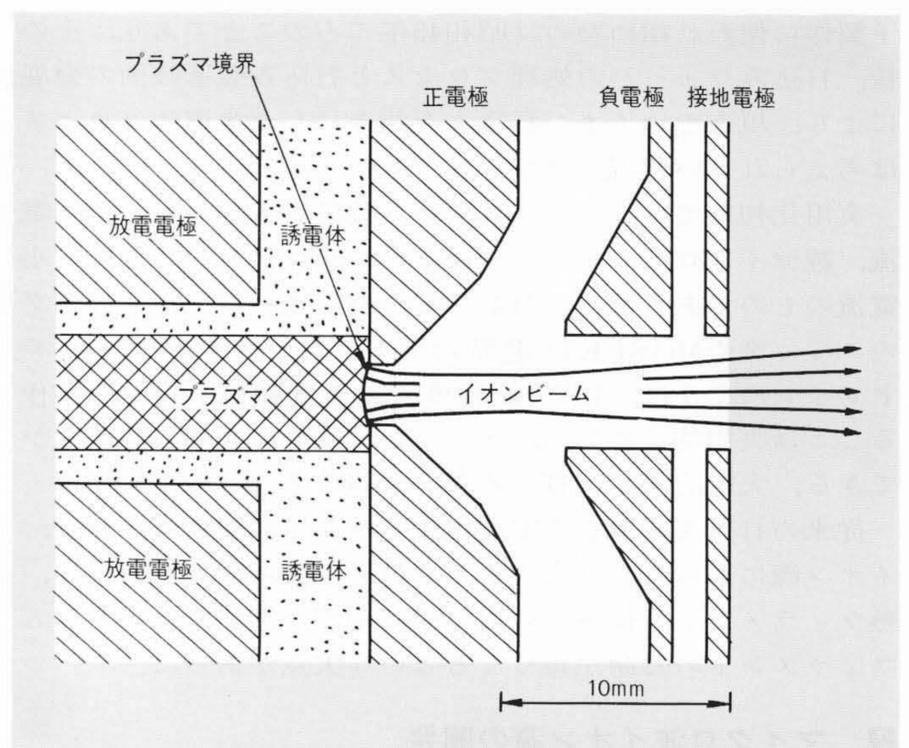


図3 イオンビーム引出し系 電極は3段のピアス形である。正電極にはイオン加速電圧がかけられ、負電極にはビーム下流からイオン源に逆流する電子を阻止するために約-2kVの電圧が印加される。

ることができた。そして、このイオン源を磁場形質量分離器と組み合わせた実験装置では、リンイオン(P^+)で15mAの打込み電流を得ることができた。この装置をもとに、生産用イオン打込み装置製作のための基礎的データの集積を行なった。

3 イオン打込み装置の試作

3.1 打込み方式の検討

打込み装置を大電流化する場合の技術課題として、上述のイオン源の長寿命化及び大電流化のほかに、次の二つの問題を解決した打込み方式の開発が必要である。

(1) 空間電荷効果

イオンビームが外部電界のないビーム輸送系を通過しているときは、上述したように残留気体分子、又は器壁との衝突で発生した低エネルギーの二次電子をビーム内に取り込んだ状

態になっており、結果的にイオンの空間電荷効果が中和された形になっている。いま仮に、ビームを静電偏向させる目的でビーム近傍に偏向電極を入れたとすると、今までビーム中に捕捉されていた電子は正電極に吸い込まれてしまい、空間電荷の中和効果がなくなる。したがって、大電流のイオンビームでは、自分自身の空間電荷で発散が起き、ターゲットまで安定に輸送されないことになる。

(2) ビームによるウェーハの加熱

イオンビームのもっているエネルギーのほとんどは、打込みのときに熱になってしまう。例えば、10mA、40kVのビームで打込みを行なうと、ターゲットには400Wの熱エネルギーが注入される。このように真空中で加熱されたシリコンウェーハの熱は、輻射又はウェーハホルダへの伝導により逃げてゆく。しかし、大気中のように空気の対流による冷却作用がないた

め、静止した状態のウェーハに上述の400Wものビームを照射すると、ウェーハの温度は数秒のうちに融点に達してしまう。

これらの問題を解決するためには、静電偏向によるビーム走査は行わず、複数枚のウェーハを機械的に動かして打込み量の均一性を保ちながらウェーハを冷却する方法を採る必要がある。

3.2 試作装置

日立製作所では昭和52年1月から、トランジスタ生産工場の生産用イオン打込み装置の試作を開始した。翌53年8月研究所で完成後、ただちに工場に移設し試運転の後、昭和54年1月からトランジスタの生産を開始した。

この打込み装置の主要部及び性能について以下に述べる。

(1) 機構部

図4にイオン打込み装置の構成を、またその外観を図5に

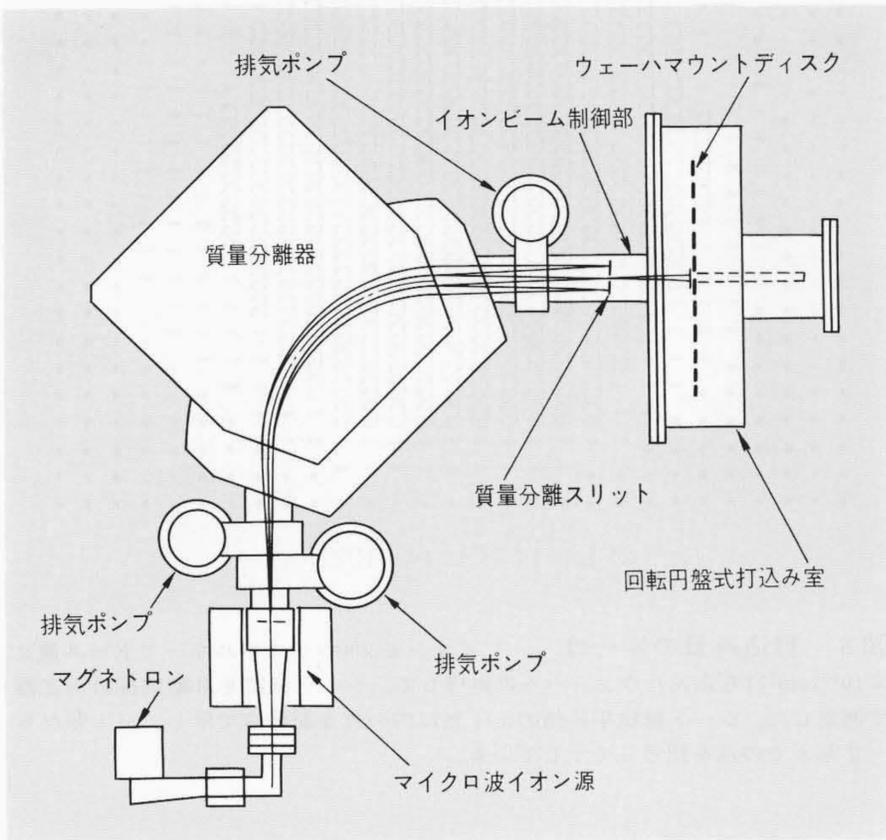


図4 試作したイオン打込み装置の構成 本装置はマイクロ波イオン源、半径40cm、90度偏向の磁場形質量分離器及び回転円盤式打込み室で構成されている。

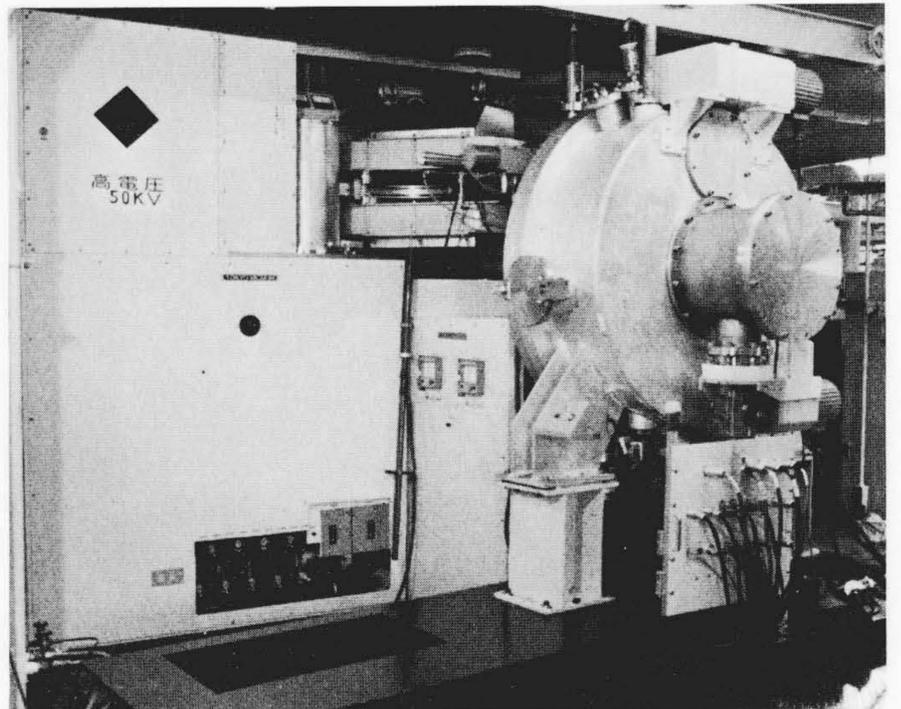


図5 試作したイオン打込み装置 左上の扉の中にマイクロ波イオン源があり、右上の真空槽が打込み室である。

示す。装置の心臓部に相当するイオン源には、上述のマイクロ波イオン源を用いている。引き出されたイオンビームから必要なイオン種を選別するための質量分離器は、磁場形90度偏向で斜め入出射の立体収束系を用い、60%の透過率を実現した。また、イオン打込み室はイオンビーム照射によるウェーハの温度上昇を避けるため、26枚の3inウェーハを円盤上に並べ、この円盤を回転させながら上下に送ることにより、ウェーハ面上に均一な打込みを行なう方式を採った。イオンビーム照射面でのビーム重心測定器及び円盤の上下位置測定用の高精度マグネスケールの採用によって、円盤の上下送り精度を上げることができ、打込み量不均一性を標準偏差で0.5%以下にすることができた。

(2) 制御部

図6にイオン打込み装置の制御系統を示す。本装置は、真空排気-水冷系制御部、イオンビームを引き出して質量分離を行なうまでの電源制御部、及び打込み室制御部から成っている。打込み室制御はマイクロコンピュータを使用しており、次のような特徴をもっている。

(a) CRT(Cathode Ray Tube)を使った対話形式によるデ

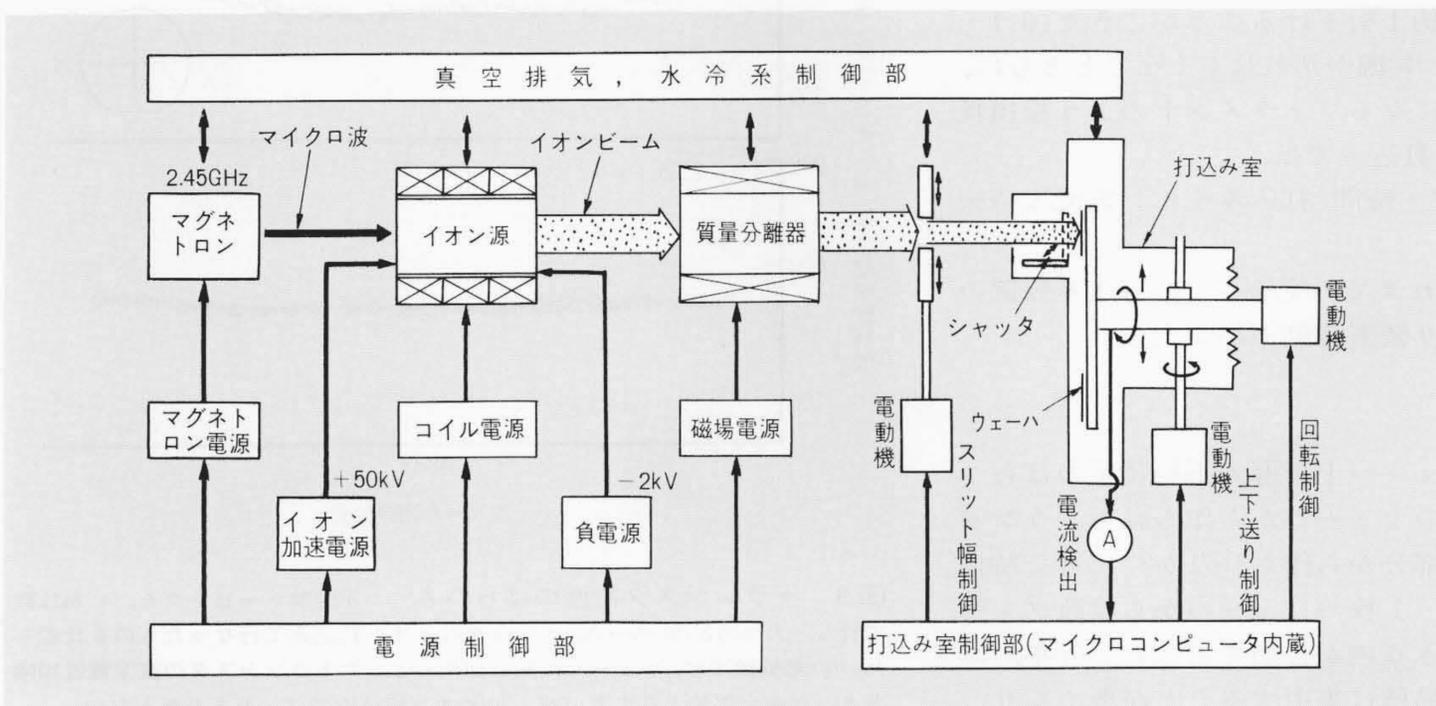


図6 イオン打込み装置の制御系統図 真空排気、水冷系制御部、電源制御部、及び打込み室制御部から成っている。

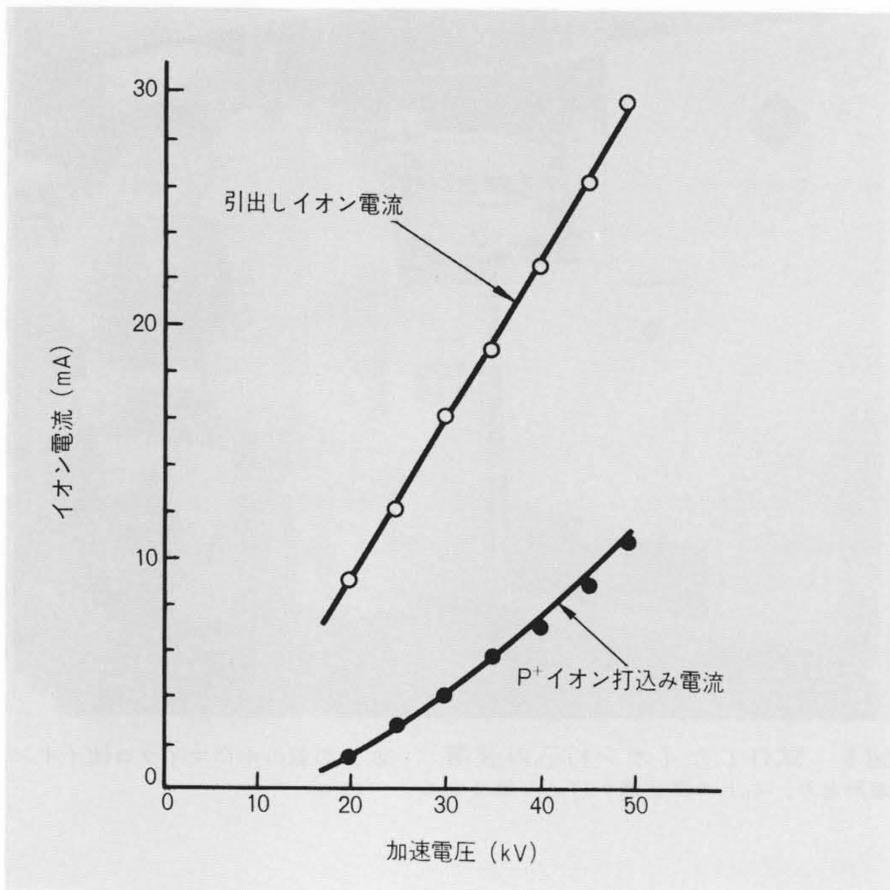


図7 イオン引出し特性の一例 イオン源にPH₃(フォスフィン)を導入して、加速電圧に対するイオン電流の特性を調べた。

- ータ入力
- (b) 打込み途中でのエラー処理を含む打込みシーケンス制御
- (c) データプリントアウト
- (3) 装置性能

マイクロ波イオン源は高密度のプラズマを発生できるため、大電流のイオンが引き出せる。この打込み装置の仕様は、

加速電圧：50kV

打込み電流：P⁺10mA, B⁺4mA

であった。この電流値は、それまでの大電流イオン打込み装置の2~3倍であった。図7はイオン源にフォスフィン(PH₃)を導入した場合の加速電圧に対するイオン引出し電流、及びP⁺イオン打込み電流の関係を示したものである。バイポーラトランジスタのエミッタ(ドーズ量 3×10^{16} atmos/cm²)をイオン打込みで作る場合、打込み時間は3inウェーハ1枚当たり約1分間になった。これは、従来方式のイオン源を使ったそれまでの大電流イオン打込み装置の約3倍の速さであった。また、このイオン源のイオン化率は従来方式のものに比べて1桁以上高く、ガス使用量を約1桁下げることができた(0.1~0.5cc/min)。このためにイオン源が汚れにくくなるとともに、従来方式のイオン源で問題になるフィラメントのような損耗部分がないため、P⁺イオン打込みでは、

イオン源寿命：1アンペア・時間(打込みイオン電流×持続時間)

以上となった³⁾。これは、それまでの電流イオン打込み装置の10倍以上である。これにより装置稼働率が向上した。

3.3 実用上の効果

(1) 歩留まりの向上

従来の熱拡散法では、ウェーハ上の導入不純物量のばらつきが大きかったため、1枚のウェーハから作られたトランジスタは、ウェーハ上のどの部分から作られたかによって特性が非常に異なった。一般に、1枚のウェーハからは数グレードにわたる種類の素子ができるのが普通であった。近年、ユーザーからの要求が特定の品種に集中することが多くなり、

このような熱拡散法では歩留まりの低下が避けられなかった。

図8は、ウェーハ内の打込み量の均一性をみるため、直径60mmのシリコンウェーハにP⁺イオンを 2×10^{16} ions/cm²打ち込み、熱処理を施して不純物を活性化したものを、四探針法によりシート抵抗を測定して打込み量の均一性を調べた一例を示すものである。抵抗値が平均値から±1%以内の点を記

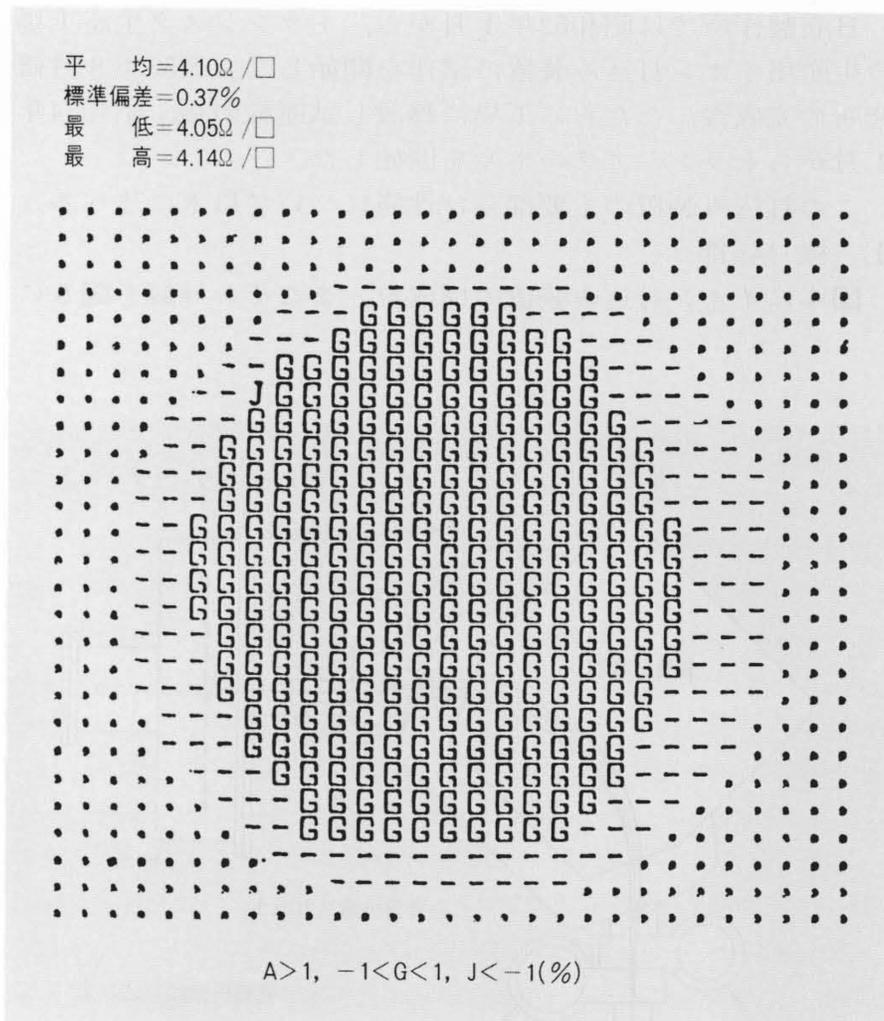


図8 打込み量の均一性 P⁺イオンを30keVのエネルギーでドーズ量 2×10^{16} /cm²打ち込んだウェーハを熱処理して、シート抵抗を自動四探針測定器で測定した。シート抵抗平均値の±1%以内の点を記号Gで示し、-1%から-2%までの点を記号Jで示している。

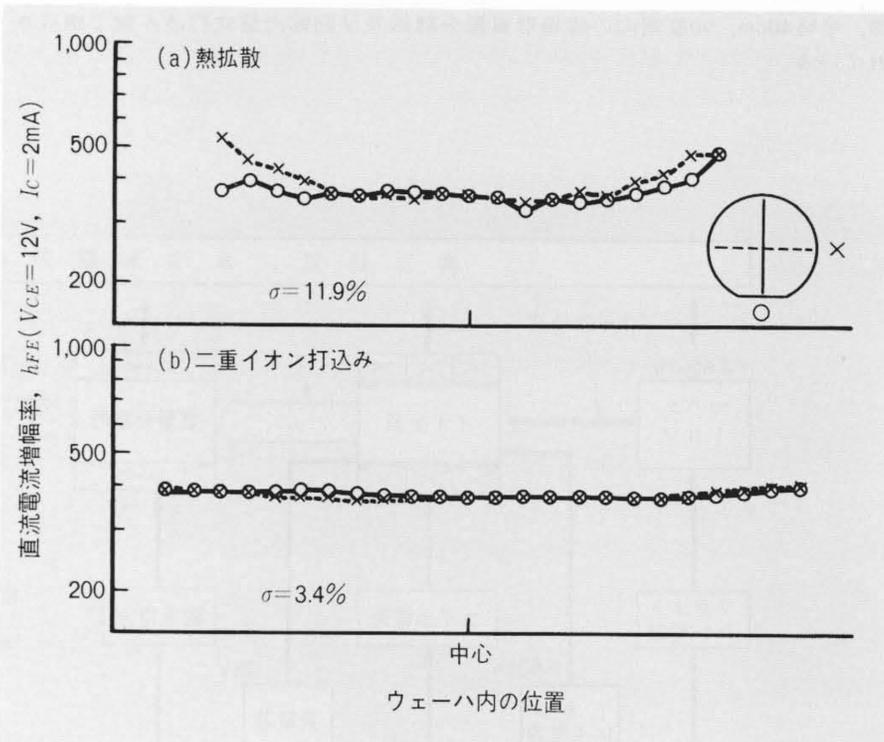


図9 トランジスタ特性のばらつき 不純物ドーピングを、(a)熱拡散で行なったものと(b)ベース、エミッタ共イオン打込みで行なったものを比較した。(a)熱拡散では、ウェーハの周辺部からとったトランジスタの直流電流増幅率 h_{FE} が中心部分より大きい、(b)イオン打込みでは、あまり差がない。

号Gで示している。ウェーハ面上での抵抗値のばらつきは標準偏差で0.37%である。一般に打込み量のばらつきは、シート抵抗値のばらつきよりも小さい。

図9はできあがったトランジスタの特性(h_{FE} : 直流電流増幅率)のばらつきを比較したもので、従来の熱拡散法では標準偏差で11.9%あったものが、イオン打込みでは3.4%と改善されており、「1ウェーハ、1グレードねらい打ち」が実現できた⁴⁾。

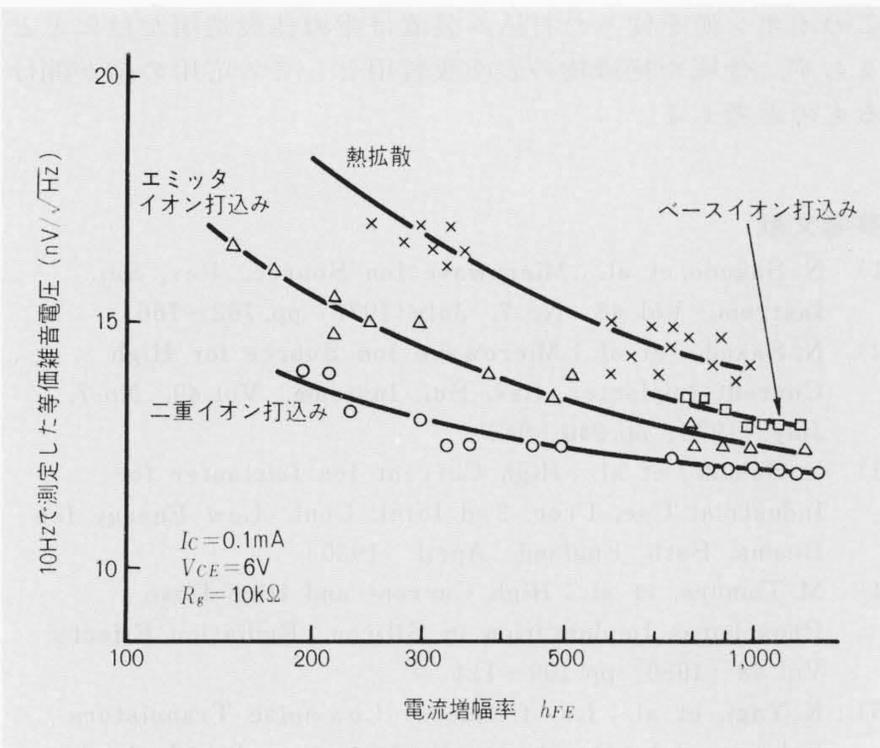


図10 小信号トランジスタの雑音特性 不純物ドーピングを、熱拡散で行なったもの、エミッタだけイオン打込みで行なったもの、エミッタ、ベース共イオン打込みで行なったものの順で雑音特性が良くなる。

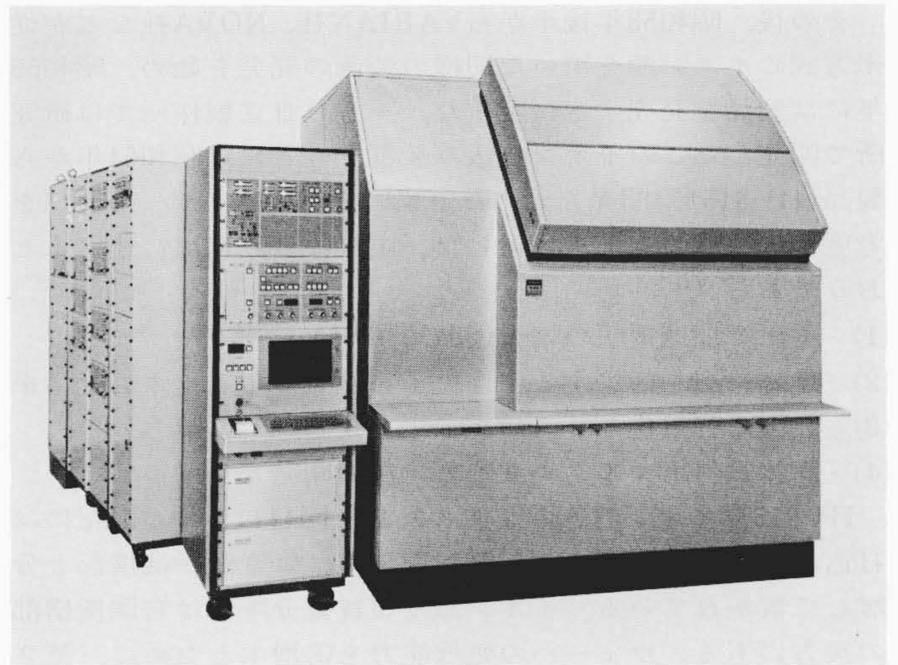


図11 イオン打込み装置製品 ビーム出し及び打込みの操作は左手前の操作卓で行なう。

(2) 素子特性の改善

図10は、小信号トランジスタを従来の熱拡散法で作ったもの、ベースだけイオン打込みで作ったもの、エミッタだけイオン打込みで作ったもの、及びベース、エミッタ共にイオン打込みで作ったものの雑音特性を比較したものである。ベース、エミッタ共にイオン打込みで作ったものが、従来の熱拡散法によるものに比べて格段に良くなっている。これにより、従来80%台であった雑音歩留まりが98%以上に改善された⁵⁾。

4 イオン打込み装置の製品化

高濃度のイオン打込みを目的とした10mA級のイオン打込み装置として、上記試作機は最も早く稼動した。

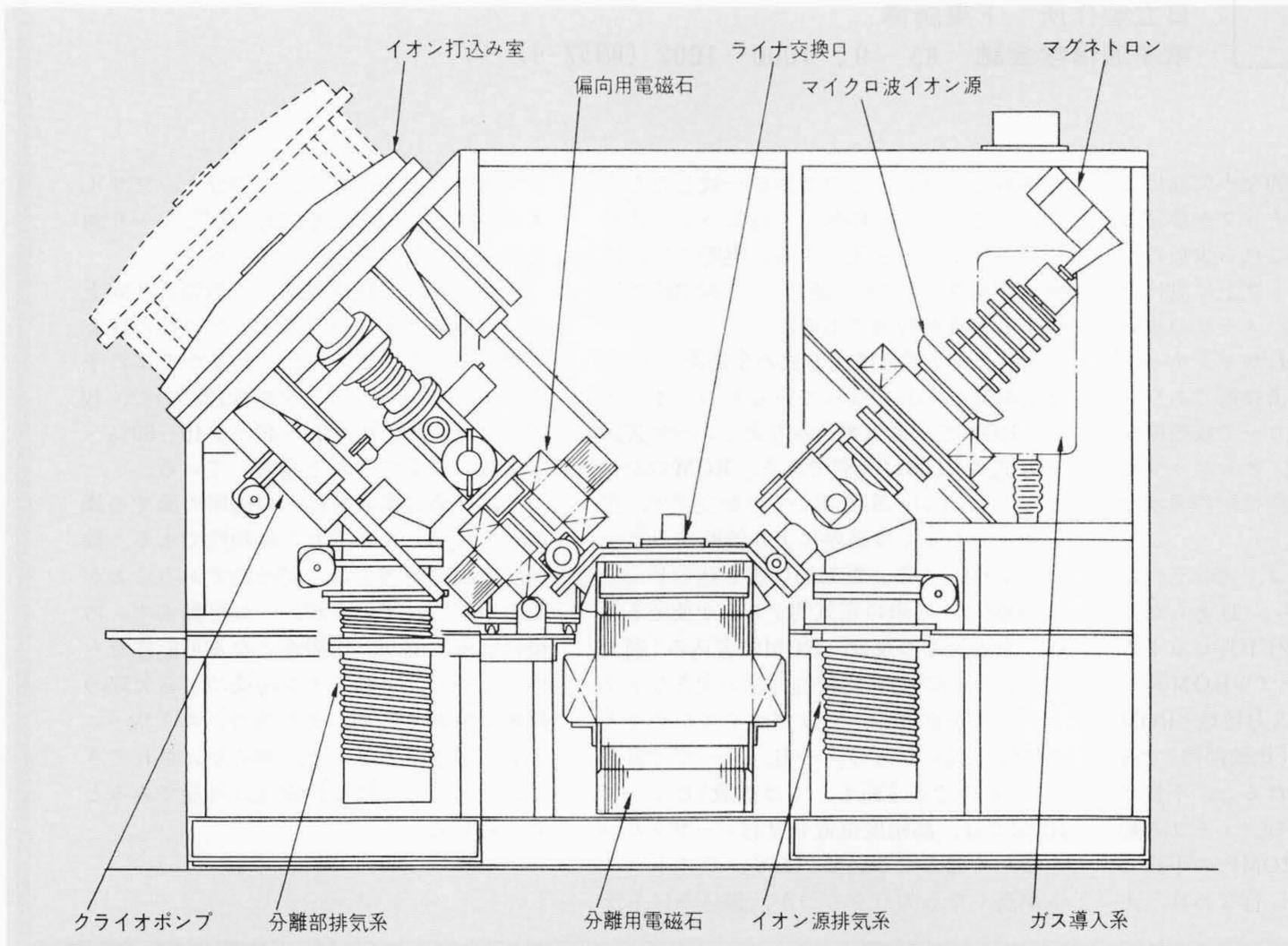


図12 イオン打込み装置製品の側面図 右上にマイクロ波イオン源があり、左上にイオン打込み室、中央に質量分離用電磁石がある。

その後、昭和53年後半からVARIAN社、NOVA社などが従来方式のイオン源を用いた同様の装置の開発を始め、昭和56年には製品を発売するに至った。一方、日立製作所では研究所で開発したこのイオン打込み装置をもとに、昭和54年から製品(IP-815形)開発を始めた。当時の社内ユーザーの要望を考慮し、機能の向上を目指した。主な改良点は次に述べるとおりである。

- (1) イオン加速電圧の増大(50kV→80kV)
- (2) ウェーハを汚染する中性粒子を除去できるイオン光学系
- (3) 装置の軽量化とコンパクト化
- (4) 固体試料用マイクロ波イオン源の開発

IP-815形イオン打込み装置の外観を図11に示す。正面には打込み室と制御卓があり、その左後方には電源が機構部と分離して置かれている。イオン源及び質量分離器は右側機構部の後方にある。ウェーハの処理能力を倍増するために、第2打込み室を第1打込み室の左側に増設できる構成にした。また、機構部の構成を示す側面図が図12である。イオンビームは右上のマイクロ波イオン源から45度斜め下方に引き出され、中央の分離用電磁石により90度偏向された後、特定のイオン種に分離され、更に偏向用電磁石により図の手前側に12度偏向されて打込み室に導かれる。そのため、分離分析管から飛来してきた中性粒子は打込み室まで達しない。打込み室を2基備えた場合には、この偏向用電磁石によってイオンビームを切り替えることができる。

製造装置では、時間当たりの生産枚数が重要である。この値を大きくするためには、打込み電流を大きくして打込み時間を短縮することのほかに、真空引きの時間を短くすること及び高速のウェーハローダ、アンローダが必要である。特に

ウェーハローダ、アンローダはごみの発生を少なくするためにも重要であり、別途開発中である。

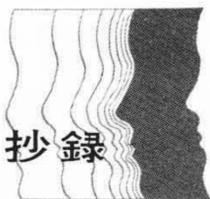
5 結 言

マイクロ波イオン源は大電流、長寿命で試料ガスの使用量が少ないため、大電流イオン打込み機用として非常に優れた性質をもっている。また、従来のフィラメントタイプのイオン源では不可能であった酸素やハロゲン化合物のように、化学的に活性なプラズマを作る試料からでも安定にイオンビームを引き出せるため、発生できるイオン種も多い。このため、このイオン源を使った打込み装置は半導体製造用だけにとどまらず、金属や絶縁物の表面改質用としての応用の道が開けるものと考えられる。

参考文献

- 1) N. Sakudo, et al.: Microwave Ion Source, Rev. Sci. Instrum. Vol. 48, No. 7, July (1977) pp. 762~766
- 2) N. Sakudo, et al.: Microwave Ion Source for High Current Implanter, Rev. Sci. Instrum. Vol. 49, No. 7, July (1978) pp. 940~943
- 3) N. Sakudo, et al.: High Current Ion Implanter for Industrial Use, Proc. 2nd Intl. Conf. Low Energy Ion Beams, Bath, England April (1980)
- 4) M. Tamura, et al.: High Current and High Dose Phosphorus Implantation in Silicon, Radiation Effects Vol. 48 (1980) pp. 109~114
- 5) K. Yagi, et al.: Low-frequency Low-noise Transistors Fabricated by Double Ion Implantation, Jap. J. Appl. Phys. Vol. 19 Suppl. 19-1 (1980) pp. 61~64

論文抄録



半導体メモリにおける欠陥救済技術

日立製作所 下東勝博

電子通信学会誌 65—9, 1000~1002 (昭57-9)

半導体メモリでは、局所的な小欠陥による少数の不良ビットをもつチップが歩留まりに大きく影響している。これら少数の不良ビットを、あらかじめチップ上に設けた予備ビットへ置換できれば、メモリの歩留まりは大幅に向上する。これがオンチップ冗長構成方式による欠陥救済技術であり、主として多くの半導体メーカーで技術開発が進められている。本稿は、オンチップ冗長構成方式を中心に欠陥救済技術の現状と展望を行なったものである。

オンチップ冗長構成方式は、次の三つの要素で構成される。すなわち、(1)あらかじめ設けられた予備ビット、(2)不良ビットの番地を記憶するプログラマブルROM素子(以下、ROMと略す。)、(3)入力番地とROMの内容の照合を行なう回路(比較回路)である。検査時に不良が発見されると、不良ビットの番地をROMに書き込む。メモリの動作時には、常に入力番地とROM内の不良ビットの番地の照合が自動的に行なわれ、入

力番地と不良ビットの番地が一致したときには、比較回路が作動し不良ビットの代わりに予備ビットを使用する。実際には、置換の容易さからワード線/データ線単位で置換する方式が普通である。

オンチップ冗長構成方式の3要素の中で、技術開発の中心となっているものがオンチップROMで、電気書込み方式とレーザー書込み方式のROMに大別できる。ROMの素材としては、Poly-Siを用いるのが主流で、主に過電流もしくは高熱により溶断するヒューズROMである。電氣的に書き込むヒューズROMは、従来の電氣的テストが使えるという利点をもつ反面、ROMの書込み(過大電流による溶断)に比較的寸法の大きなトランジスタが必要で、チップサイズがやや大きくなる欠点をもつ。一方、レーザーで書き込む(高熱での溶断もしくは拡散)ヒューズROMでは、高精度位置合せ付レーザートリマを新しく導入する必要があるが、テストコストが高くなる欠点をもつが、書込みにトラ

ンジスタは必要でなく、その分チップサイズが小さくなる。現状では、電気/レーザー両方式が平行して開発されている。

オンチップ冗長構成による歩留まり向上効果は極めて大きい。米インモス社の16kスタティックメモリでは、わずか2本の予備データ線(正規のデータ線は128本)で、救済なしでの歩留まり20~40%を40~60%へと大幅に向上できたと発表している。

欠陥救済技術の製品への適用の面での課題は、救済したメモリの信頼性である。救済する欠陥の多くは、局所的であることが明らかにされているが、一つ可動イオン汚染による欠陥が、伝搬性となる可能性をもつ。しかし、可動イオン汚染による欠陥の確率は極めて低く、また適当なスクリーニングも可能であることが明らかにされてきており、十分な信頼性確保は可能であると考えられる。