

	あくつ いさお
氏 名	阿久津 功
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 13 年 9 月 12 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学位論文題目	高効率半導体生産ラインを実現する排気システムの研究開発
指 導 教 官	東北大学教授 大見 忠弘
論文審査委員	主査 東北大学教授 大見 忠弘 東北大学教授 坪内 和夫 東北大学教授 高橋 研 東北大学助教授 須川 成利

論 文 内 容 要 旨

1 目的

300mm シリコンウェーハや大型ガラス基板に代表されるこれからの半導体・ディスプレイ製造装置においてプロセスの高速化及び大口径・大型基板全表面の均一性確保のために大量の原料ガスが必要となる。かつ大量の反応生成ガスが発生する。その作業圧力は数 mTorr から数 100mTorr の範囲のプロセスが多く、ターボ分子ポンプ (ネジ溝ポンプ) は使用圧力限界近傍で使用されているプロセスと、使用できないプロセスに二分される。

CVD 装置の場合はバックポンプ (ブースターポンプとバックポンプの組み合わせ) のみで排気をするため太く、長い配管を使用している。それでも配管コンダクタンスが小さくなり大排気速度のポンプを使用している。

また水素等の分子量の小さいガスの排気速度は希釈ガスを大量に流しても極端に低下している。

これらの課題を一気に解決し、システム LSI、大型平板ディスプレイなどを高収益に製造する新しいユーティリティ技術を実現する不等リード不等傾斜角スクリーポンプ及び排気システムの研究開発した。

2 従来の技術とその課題

これまでの低真空ポンプは 1660 年 Rupert が開発した水シールポンプが現代のベーンポンプの基礎となり、1909 年 Wolfgang Gaede が現在でも基本設計はそのまま踏襲されているゲーテ型油回転ポンプ (ベーンポンプ) を発表した。

また高真空ポンプは Gaede が 1911 年分子ポンプの特許を取得し、1915 年に実用機を完成させた。

Dushman の実測によると 8000rpm において到達圧力 4×10^{-4} Torr、背圧 20Torr の性能であった。当時としては高速回転のため機械技術的問題で拡散ポンプの発達によって一時忘れ去られていたが、その後超高真空の時代に移り、オイルフリーの真空が要望されて来るようになり、ターボ分子ポンプが脚光をあびるようになってきた。

1958 年 Becker は現在の分子ポンプに近い実用型を開発した。その性能は $10^{-2} - 10^{-9}$ Torr の間において約 $500 \text{ m}^3/\text{h}$ ($140 \text{ l}/\text{sec}$)、到達圧力 10^{-9} Torr であった。このように現在の真空ポンプは改善、

改良は進んで来ているが粘性流域と分子流域のポンプはそれぞれ領域で別々に開発が進められてきており、全く新しい形式で粘性流域から分子流域までの広領域で安定した大排気速度を維持するポンプはまだ開発されていない。

2-1 従来のユーティリティ技術の課題

現状の排気システム図 1-1 は三次元立体化クラスターツールのユーティリティシステムを現状の技術で構成した生産ラインである。冷却水ライン、排気ライン、特殊ガスライン、ハウスガスライン、電源ラック、制御線ラックおよびメインポンプとバックポンプとの間の配管等の太い配管が複雑に入り組んだジャングル状態にあり、配管の施工が現実的に不可能に近い状態にある。

このバックポンプ（ブースターポンプとバックポンプの組み合わせたもの）は吸入側配管コンダクタンスが小さく、バックポンプの排気速度が著しく低下するために大型のポンプを使用している。

またプロセス装置一台ごとに大型のバックポンプ、除害機、チャンバ加熱用チラー、ウェーハステージ冷却用チラーが必要となり地下ユーティリティフットプリントが大きくなり 9.5m² にあたり、この三次元立体化クラスターツールのプロセスエリアの 2.3 倍に達する。このために地下ユーティリティでライン全体の面積が決定される状態にある。

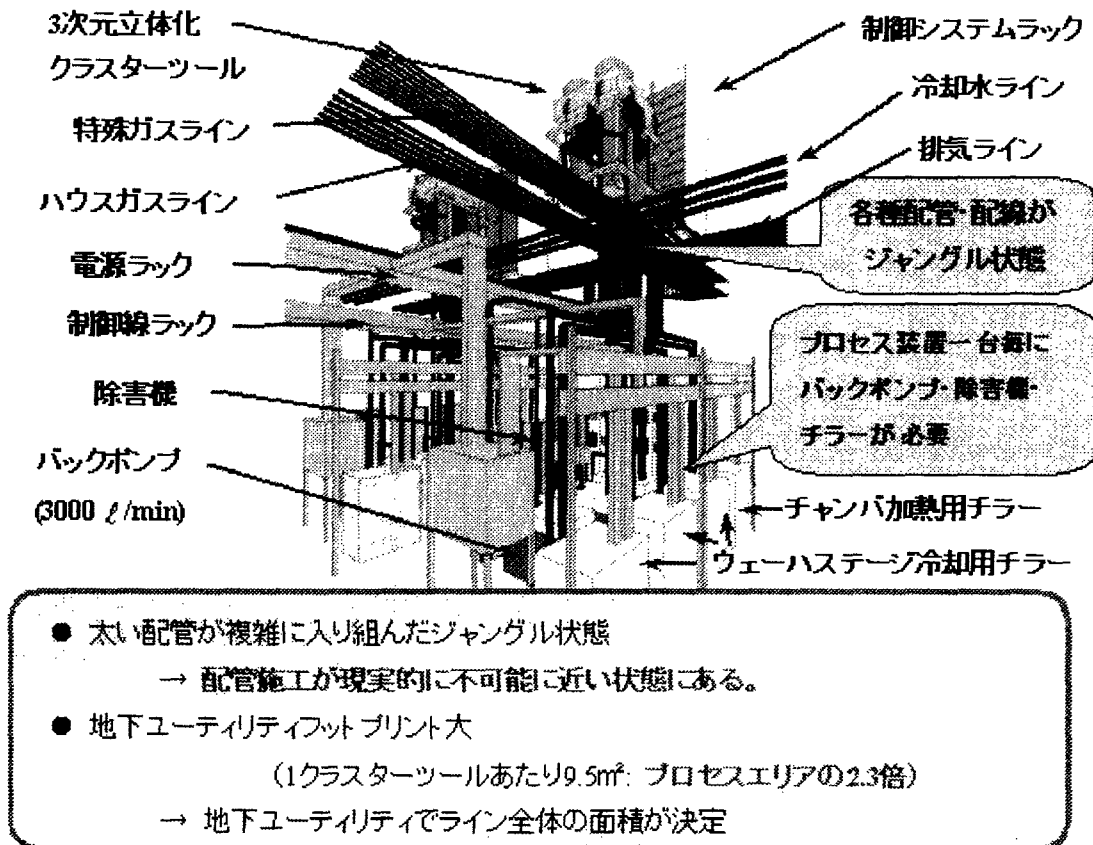


図 1-1 現状技術におけるユーティリティシステム

2-2 新しいユーティリティ技術

高収益小規模生産ラインに対応した新しいユーティリティ技術で、三次元立体化クラスターツールのプロセスチャンパーには分子ネジ溝複合型ポンプが二台取り付け、その側近に高圧縮比のスクリー型ブースターポンプを取り付ける。このスクリー型ブースターポンプは高圧縮比のためスクリー型ブースターポンプの背圧を数 10 Torr に保持することで排気性能を維持することができる。

スクリー型ブースターポンプとバックポンプの間の配管は粘性流域のためコンダクタンスの影響が少なく、細い配管で、小さなバックポンプで排気が可能となる。バックポンプからの排気ガスはガス回収、再利用システムに送られ、回収ガスと排気ガスとに分離される。回収ガスは再利用に、排気ガスは少量となり細い配管で排気される。また機器ごとの温度制御方式により、冷却水量が 1/4、配管径が 1/2 となり、配管ジャングルの解消、配管施工が容易となる。これらによって地下ユーティリティフットプリントは激減し、三次元立体化クラスターツールあたり 3.2mm^2 となり、プロセスエリアより小さくなる。

または大きなドライポンプ（バックポンプ）で複数台のブースターポンプを排気する事も可能となる。これらによって設備コスト、省エネ及びランニングコスト等を大幅に改善した排気システムとなる。

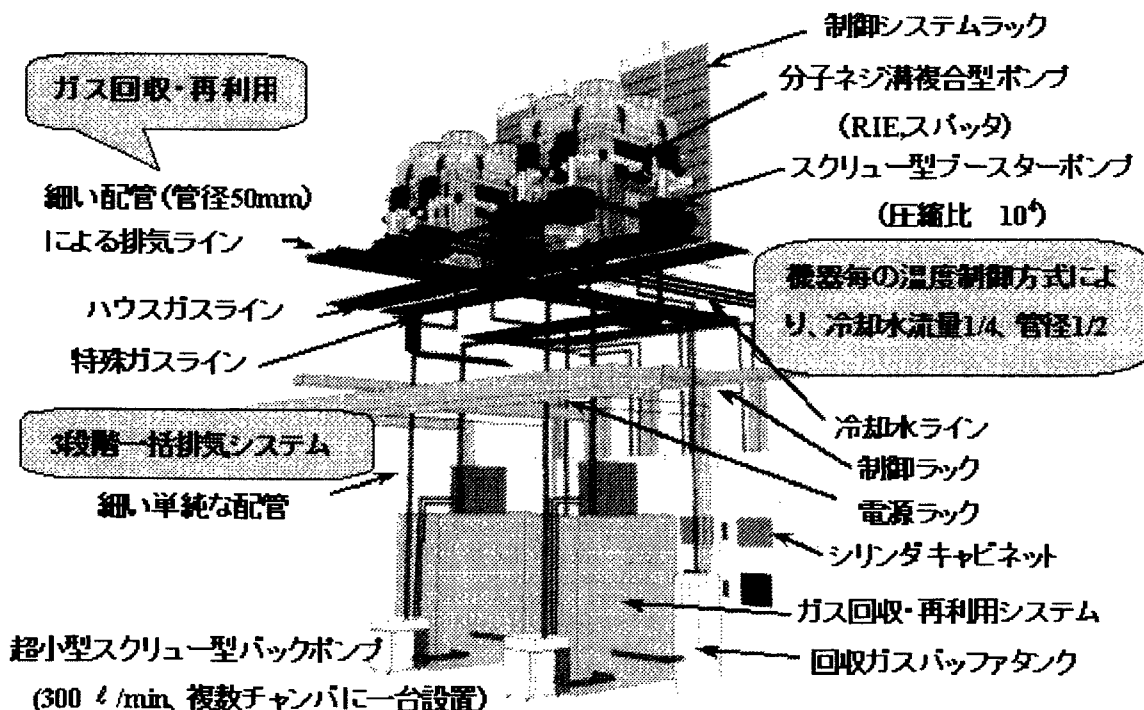


図 1-2 高収益小規模生産ラインに対応した新しいユーティリティ

この排気系を構成する高圧縮比ブースターポンプ、高圧縮比ブースターポンプ複数台一括排気用 2400 l/min バックポンプ、高圧縮比ブースターポンプ単独排気用 300 l/min バックポンプ及び排気システムの研究開発が急務となった。

3 バックポンプ、高圧縮比ブースターポンプ性能評価

補正係数(効率) K を導入し、 K の値によってスクリーポンプの構造的なコンダクタンスの影響による設計排気速度の減少率を評価した。等リード構造の場合には、 K は設計排気速度の大きさと構造的コンダクタンスの比 ξ の関数で表される。コンダクタンスは高い圧力領域では十分に大きく、その結果排気速度・コンダクタンス比 ξ は十分に小さく K は殆ど 1 に近く問題ないが、吸入圧が低くなると構造的なコンダクタンスの影響が顕著になる。分子流領域の低い圧力では、標準的なサイズ、形状のスクリーポンプの場合、 K の値は 40% 以下となり、設計排気速度と実行排気速度との比率(効率)は大きく下がることを免れない。理想的にはコンダクタンスと設計排気速度の比率が常に一定に近いことが、効率 K を大きくする要点と考えることができる。不等リード構造のスクリーは、その製造過程で多くの技術的困難が伴うが、その困難を解決すれば等リード構造のスクリーポンプでは得られない長所、即ち分子流の圧力領域における排気速度の低減の幅を少なく抑えることができる。

3-1 2400 ℓ/min の不等リード・不等傾斜角スクリーバックポンプ

2400 ℓ/min の不等リード・不等傾斜角スクリーバックポンプは粘性流域から分子流域に互り安定した排気速度を維持する。また H_2 の排気速度は吸入圧が 1Torr までは N_2 とほとんど同じで、1Torr から分子流域に向かって H_2 の排気速度が増加する。

逆拡散は吸入口より 1 sccm 以上のガスを流すことで測定限界以下となり、シール・希釈ガス量においては 1 ℓ/min 以下となる。シール・希釈ガス量が少ないため地球温暖化の原因となる PFC ガス、高価なガス Kr、Xe の再生再利用が容易になる。

生成物対策はポンプの吸入・圧縮・移送・排気の圧縮熱でポンプ全体を加熱して生成物の発生を抑える。スクリーの噛み合いは噛み合いピッチからはずれた位置に設け、互いの噛み合い歯面速度を変え、掻きだし効果を持たせたため生成物の堆積がない。腐食対策は接ガス部を全てテフロンコートする。消費電力は 10 Torr 以下の圧力で 3 kW 以下となる。以上により、この不等リード・不等傾斜角スクリードライポンプは半導体デバイスの高性能化及び生産性の向上に十分対応できるものと期待される。

3-2 300 ℓ/min の小型スクリーバックポンプ

300 ℓ/min の小型スクリーバックポンプは粘性流域において安定した排気速度を維持する。特に高圧縮比ブースターポンプの背圧 1-30Torr の領域は安定した排気速度を維持している。シール・希釈ガス量は 1 ℓ/min 以下となり、シール・希釈ガス量が少ないため地球温暖化の原因となる PFC ガス、高価なガス Kr、Xe の再生再利用が容易になる。生成物対策はポンプの圧縮排気による圧縮熱でポンプ全体を加熱して生成物の付着を抑える。スクリーの噛み合いは噛み合いピッチからはずれた位置に設け、互いの噛み合い歯面速度を変え、掻きだし効果を持たせた。腐食対策は接ガス部を全てテフロンコートする。

高圧縮比スクリーブースターポンプのバックポンプとして半導体デバイスの高性能化及び生産性の向上に十分対応できる。

3-3 高圧縮比スクリープスターポンプ

不等リード・不等傾斜角スクリープスターポンプは圧縮比が 10^4 と高圧縮比のためにブースターポンプの背圧は粘性流域での排気となり、バック配管径は 10mm 程度で従来の $1/3-1/4$ となる。バックポンプは $1-30\text{Torr}$ の領域で安定した排気速度を維持する小排気速度の小型バックポンプで不等リード・不等傾斜角スクリープスターポンプの性能を十分維持することが可能となった。不等リード・不等傾斜角スクリープローターを開発したことで H_2 、 He ガス等分子量の小さいガスも N_2 ガスも粘性流域から分子流域まで安定した排気速度を維持する。シール・希釈ガス量は 1 l/min 以下となり、シール・希釈ガス量が少ないため地球温暖化の原因となる PFC ガス、高価なガス Kr、Xe の回収再利用が容易になる。生成物対策はポンプの圧縮熱でポンプ全体を加熱して生成物の付着を抑える。

またスクリープ噛み合いをスクリープ噛み合いピッチ円からはずれた位置に設計して互いの歯面速度を変え、掻き出し効果を持たせ、ポンプ内に生成物の堆積を抑えた。

腐食対策は接ガス部を全てテフロンコートする。消費電力は 10 Torr 以下の圧力で 3 kW 以下となる。不等リード・不等傾斜角スクリープスターポンプの開発によって、新しい排気システムはプロセスチャンバー近傍に新開発のブースターポンプを設置する。このブースターポンプとバックポンプの間の配管径は 10 mm 、長さ 10 m としても配管コンダクタンスの影響が非常に小さく、消費電力の小さい小型のバックポンプでブースターポンプの性能を十分発揮でき、配管の煩雑さを解消できた。

4 半導体・FPD 生産ライン用高効率排気システムの実験値と計算値にもとづく検討

新開発高圧縮比スクリープ型ブースターポンプを用いた 3 段または 2 段排気システムのバックポンプは粘性流域で排気するためブースターポンプとバックポンプの間の配管は細く単純な配管となり、配管ジャングルが解消され、配管施工が容易となる。またバックポンプは小型、小排気速度のポンプとなる。中間流、粘性流の配管コンダクタンスの計算値と実際のコンダクタンスとの差は配管の入口圧力と配管出口圧力の平均圧力の精度で決定される。平均圧力の精度を上げ、そのコンダクタンスによって排気速度を算出すると実測値と概ね一致するため配管の設計には平均圧力が重要となる。消費電力は従来のポンプに比較すると、プロセスチャンパー一台ごとの排気の場合はポンプ電力が $1/2$ 、配管加熱電力が $1/4$ となる。一括排気の場合はポンプ電力が $1/5$ 、配管加熱電力が $1/5$ となり、省エネ効果が期待できる。高価な Kr、地球温暖化の原因となるガス (PFC) の回収はポンプの希釈ガスが 1 l/min と少量なため回収が容易となり、現状では Kr 1 l/min の回収再生費用は 2 円 以下が期待できる。

5 結論

高圧縮比スクリープ型ブースターポンプ、 2400 l/min の不等リード、不等傾斜角スクリープバックポンプ、 300 l/min の小型スクリープバックポンプが半導体・ディスプレイ工業界における、半導体デバイス・ディスプレイの性能向上、高生産性向上に大きく貢献できるものと期待する。

論文審査結果の要旨

半導体・ディスプレイ製造に使用するシリコンウェーハやガラス基板は 300mm 径や 1m 角に達しますます大型化している。特に減圧装置における高精度均一高速プロセスを可能にするためには大口径・大型基板に対応できる高精度なガス均一供給・高速排気システムの実現が不可欠である。これらの減圧プロセスは圧力として数 mTorr から数 Torr の範囲を使用する 경우가ほとんどであるが、現状、こうした圧力領域で高効率に作動する真空ポンプが無いことから、ポンプの大型化、消費電力の増加、希釈ガスの大流量化、排気ダクトの大口径化といった排気システムに関わる生産性悪化の課題が数多く存在する。本論文は、これらの課題を一気に解決し、システム LSI・大型平板ディスプレイ等を高収益かつ高効率に製造するための新規なガス排気システムに関する研究成果をまとめたものであり、全文 5 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、新規な不等リード不等傾斜角スクリーューポンプを提案し、その基本設計論を論じている。吸入口部分のスクリーューロータ歯の角度を 45° とし排気口に向かって徐々に角度を小さくしつつ歯のピッチも縮める 2 枚歯構造のスクリーューロータを採用することにより、分子流域 (1mTorr) から粘性流域 (760Torr) まで安定した排気速度を有する世界で初めての画期的な真空バックポンプを実現することに成功している。このバックポンプは、希釈ガス量が従来の $1/10$ 以下、大気成分の巻き込みがなく、水素のような低分子量ガスでも排気速度の劣化がない等の従来のポンプを革新する数々の特徴を有している。このポンプは半導体・ディスプレイ製造に限らず、ガスを流しながら減圧化で各種プロセスを実施するあらゆる分野に適用できるものであり、実用上きわめて有益で重要な成果である。

第 3 章では、新規な 10,000 を超える高圧縮比スクリーューブスターポンプに関して論じている。本スクリーューブスターポンプは第 2 章で論じた不等リード不等傾斜角スクリーューポンプの分子流領域側約半分のスクリーューロータから成る。従来はブスターポンプの圧縮比が 10 程度と低かったため大排気速度のバックポンプおよび太い排気用配管が必要となる等の課題を有していた。本スクリーューブスターポンプは 10,000 以上の圧縮比を持ち 1mTorr から 30Torr まで安定した排気速度を有し、この全圧力領域で背圧を 30Torr 程度にできるので排気配管径を 10mm 程度に細くすることが可能となり、コンパクトな省エネルギー排気システムが実現できる。これは実用上きわめて有益な成果である。

第 4 章では、排気系のコンダクタンスを実測値と計算値から検討し、第 2 章のバックポンプと第 3 章の高圧縮比スクリーューブスターポンプを組み合わせた実用的な半導体・ディスプレイ製造の小フットプリント高収益生産ラインの排気系システムに関して論じている。従来のポンプを使用した場合に比べて、プロセスチャンパー一台ごとにバックポンプを使用した場合は排気系システムの消費電力はポンプ電力が $1/2$ 、配管加熱電力が $1/4$ となる。また、集積排気システムも提案しており、この場合はポンプ電力が $1/5$ 以下、配管加熱電力が $1/5$ 以下とさらに消費電力を削減している。さらに高価な希ガスや地球温暖化の原因となるガス (PFC) の回収・再利用システムに関しても論じている。これは実用上きわめて有益で重要な成果である。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、新規な不等リード不等傾斜角スクリーューポンプに関して理論的に論じ、かつ、実際にバックポンプ、高圧縮比スクリーューブスターポンプを作成してその性能を検証、さらに実用的な半導体・ディスプレイ製造の小面積高収益生産ラインの排気系システムに関して新規な排気システムを確立したものであり、半導体・画像電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。