

## DIIN プロジェクト

DIIN プロジェクトは日本の半導体産業の復権のために、製造技術の高度化・効率化を軸として、顧客ニーズ瞬時製品化対応新生産方式の創出を実現すべく、東北大学 大見忠弘教授をプロジェクトリーダーとし、2002 年発足した。

本プロジェクトにおける最大の成果はマイクロ波励起高密度プラズマ装置の開発に成功し、シリコン窒化膜をはじめとする絶縁膜の低ダメージ、低温形成およびドライエッチングを可能にしLSI製造に大きく貢献している。また本装置の実用化により、これまで困難とされてきたシリコンの新しい結晶面での高速デバイスの実用化の見通しが得られるなど、革新的な半導体の開発を可能とした。

本プロジェクトは 2007 年を持って完了し、2008 年新しい構想の下で、産官学連携の第2DIIN プロジェクトが大見忠弘リーダーのもとスタートしている。

### 1 DIINプロジェクト設立背景

1990 年代後半、日本の半導体産業の衰退が問題となり、21 世紀に向けて日本の電子工業の復活と日本の生活者の豊かさが増大してゆくためには、これまでにない革新的な研究開発とその実用化が必要と感じられるに至った。

日本の半導体産業の復権を目指し、産・官・学が連携した、国家プロジェクト MIRAI、および民間プロジェクト あすか、そして産官共同プロジェクト HALCA (Highly Agile Line Concept Advancement)「高効率次世代半導体製造システム技術開発」(プロジェクトリーダー 大見忠弘) が推進されてきた。そしてそれらと並存する形で東北大学 DIIN プロジェクトおよび関連する産官学共同プロジェクト「高密度プラズマ製造装置」が推進された。本稿ではDIIN プロジェクトおよび関連する「高密度プラズマ製造装置」プロジェクトについて詳述する。

東北大学では、創立以来「実学尊重」の教育・研究を実践しており、産業界への技術移転も多くの実績を持っている。大学が創り上げた学問・技術を活用して新しい産業の創出を使命・役割とする、未来科学技術共同研究センター(New Industry Creation Hatchery Center: NICHe)が、国立大学として初めて 1998 年に設立された。

東北大学、電子工学科の大見忠弘教授は NICHe の設立と同時に、NICHe 在籍教授を任命され、これまでの研究成果のすべてをつぎ込んだ、産官学連携研究プロジェクトの立ち上げを検討することとなった。

### 2 DIINプロジェクトの目的および概要

#### 2.1 DIINプロジェクトの発足

DIIN プロジェクトは New Intelligence for IC Differentiation の頭文字をとったもので、「21 世紀型顧客ニーズ瞬時製品化対応新生産方式の創出」と称せられているもので、2001 年 4 月か

ら 2007 年 3 月まで、NICHe において、大見忠弘教授をプロジェクトリーダーとして設立、実施されたものである。

NICHe に籍をおくこととなり、新しく研究開発を始めるにあたり、大見はこれまでとは全く異なる新しい半導体技術開発の構想を暖めており、その推進の時期であると判断し、その実現こそが近年低迷を続けているわが国の半導体産業に新しい息吹を吹き込み、新産業の創製につながり、日本国民の豊かさの増大が必ず実現することができるとの確信を持ち、日本国内の半導体メーカーおよび半導体製造のインフラに関連する多くの企業に具体的な研究開発の方策を訴えた。

その方策は、21 世紀初頭の決戦場ともいべきデジタルネットワーク情報家電分野の主導権をわが国に確立するために、システム LSI の集積度および性能を圧倒的に向上させるとともに消費電力を激減させ、半導体超短期間製造を実現する具体的な研究開発計画を立案し、各企業のトップにその賛同を呼びかけた。

その結果、多くの企業からの賛同を得、総額 45 億円の民間からの醸金を得ることができた。そして、この醸金を国際科学振興財団に民間からの寄付金として集め、東北大学、NICHe に隣接し未来情報産業研究館を新築し、その工事が完了した時点で国に寄付した。

かくして 2002 年 1 月、未来情報産業創製寄付研究部門、産官学連携研究プロジェクト「21 世紀型顧客ニーズ瞬時製品化対応新生産方式の創出」(略称 DIIN プロジェクト)が発足した。

## 2.2 DIIN プロジェクトの概要

DIIN プロジェクトの研究開発拠点となる未来情報産業研究館は地下 1 階、地上 6 階の建物で、地下 1 階から 4 階にかけて、約 600 平方メートルと 700 平方メートルのクリーンルームが 2 室設置されている。5,6 階は設計 CAD 室、測定評価室、研究室などが配置され、最大 120 名の研究者を収容することが可能である。

DIIN プロジェクトではシステム LSI 時代の主流となる多品種少量生産対応段階投資型生産方式の創出を目指し、システム性能を圧倒的に向上させるために必要なアルゴリズム、アーキテクチャ、回路、デバイス、プロセス、装置、部品、材料、計測評価、インフラ・ユーティリティのすべてについて、その一項目でも欠けることにより本来の目的を達成できないとの、大見の信念から、すべてを同時並行的に進めることとしている。

具体的には、

1. 顧客のニーズから瞬時に LSI 設計を可能とするソフトウェアアクセラレーター技術
2. 10GHz クロックをはるかに超える超高速 LSI を実現するためのラジカル反応ベーストランジスタ形成技術
3. 上記プロセスを実現するための装置、インフラ、ユーティリティ技術などを含むものである。<sup>1</sup>

図 1 に未来情報産業研究館の概観写真を、図 2 に内部構造を示した。



図1 未来情報産業研究館概観写真

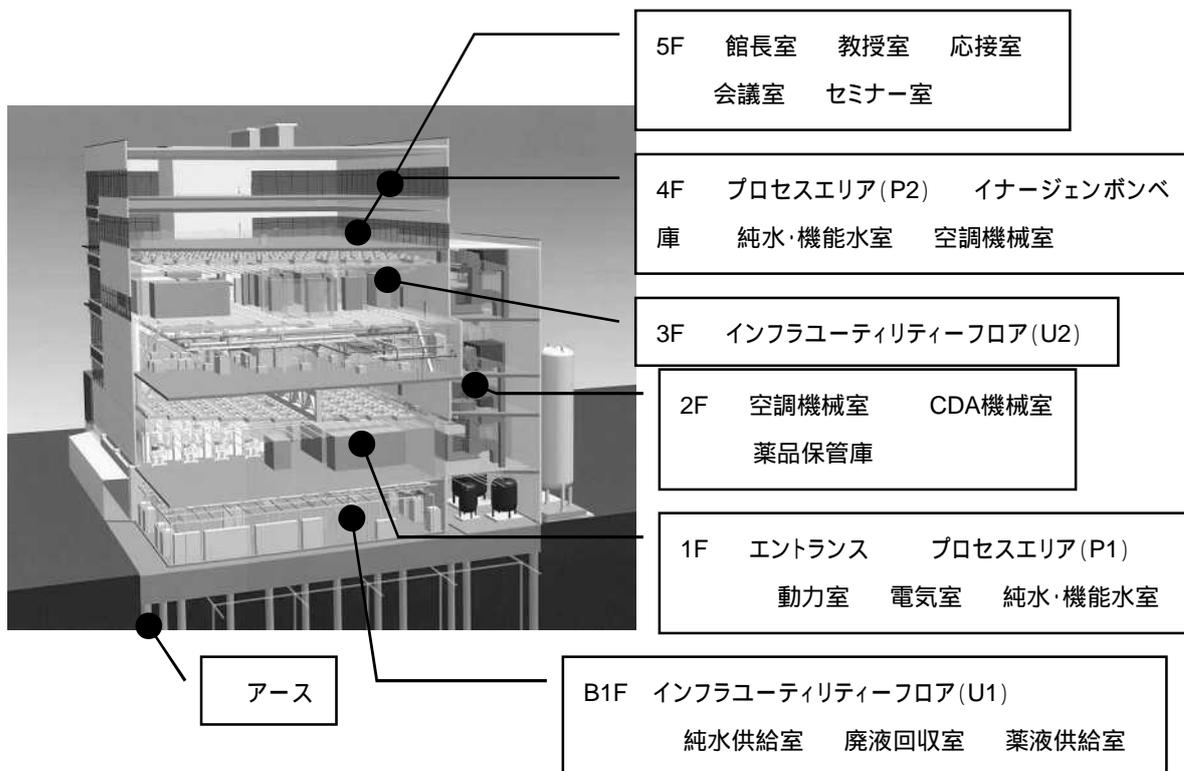


図2 未来情報産業研究館内部構造

本研究館は大見が過去 16 年間の研究開発の英知のすべてを注ぎ込み、様々な新技術が導入されている。厚さ2mのひび割れをいっさい生じないコンクリート・マット・スラブなどにより建物の微細振動を 0.15 μm(2Hz にて)に抑制し、地中に埋め込んだ銅メッシュと建物の杭、鉄骨などをすべて電氣的に接続し、構造体全体をアースとすることで接地抵抗 0.08 以下を実現した。

スーパークリーンルームの実現においても、建材、塗料、配管表面などからの有機ガスを徹底的に排除する工夫が施され、内装材に世界で初めてガルバリウム鋼板を採用するなど、建材に導電性材料を使用し静電気による微細なゴミの付着をなくすなどの方策を実施し、Fluctuation Free Facility (略称 FFF)と呼ぶ、変動を極力押さえ込んだ、スーパークリーンルームを完成させた。図3に上記の要素技術を採用した未来情報産業研究館内部構造を示している。本技術は本プロジェクトに参画した多くの企業で採用されているが、2004 年に建設された、青森県工業総合研究センター未来技術研究棟は大見の指導により完成したものである。<sup>2</sup>

図 3 に本プロジェクトに参画もしくは協力した企業名などを含め、DIIN プロジェクトの概要を示した。

**DIIN (New Intelligence for IC Differentiation)プロジェクトの現状**

**研究実施場所:** 東北大学未来情報産業研究館

**期間:** 6年間 (2001年4月~2007年3月)

**2001.11:** 研究施設竣工

**研究開発費:** 125億円、人員: 120名(最大)

**研究プロジェクト協力企業:**

半導体デバイス: シャープ、セイコーエプソン、ローム

半導体装置: アドバンテスト、タケダ理研、東京エレクトロン

部品・材料・インフラ: オムロン、熊谷組、ステラケミファ、フジキン

**研究施設建設協力企業**      **設計・施工:** 10社      **部品・材料・機器:** 43社

図3 DIIN プロジェクト概要

### 3 DIINプロジェクトへの NEDO の関与

DIIN プロジェクトの一つの大きい成果として、マイクロ波励起高密度プラズマ技術を用いた研究開発成果が発展し、NEDO から「マイクロ波励起高密度プラズマ技術を用いた省エネ型半導体製造装置の技術開発」(以下高密度プラズマ製造装置プロジェクトと略称する)なる産官学共同プロジェクトが 2002 年から 2005 年の期間(当初 3 年計画で開始、その後 1 年延長)で総額 36.5 億円の運営費交付金という形で研究開発委託された。

この高密度プラズマ製造装置プロジェクトの位置づけは、2001年第2次科学技術基本計画が閣議決定され、重点化分野として情報通信分野が特定され、この政策指針を受け、経済産業省では「高度情報機器・デバイス基盤プログラム」として19のプロジェクトが設定されたものの一つであり、19の中には、次世代半導体材料・プロセス基盤(MIRAIプロジェクト)や極端紫外(EUV)露光システム開発プロジェクトなども同時に進められている。<sup>3</sup>

#### 4 DIINプロジェクトの研究開発体制

DIINプロジェクトは東北大学未来化学技術共同開発センターの大見忠弘教授をプロジェクトリーダーとして、須川成利教授、寺本章伸助教授、白井泰雪助教授、平山昌樹助教授、後藤哲也助手、今泉文伸助手のスタッフを配し、大学院博士課程、修士課程の学生約40名、そして30社を越える協賛企業からの50名に及ぶ派遣研究員から構成され、総勢100名を越えるメンバーが大見リーダーのもと、未来情報産業研究館を中心に研究開発を精力的に行っている。

高密度プラズマ製造装置プロジェクトは大見教授がプロジェクトリーダーで、大学の受託者として東北大学未来科学技術共同研究センター長 中島一郎教授、研究員としてDIINプロジェクトの上記各教職員がその任にあたり、企業の受託者として東京エレクトロン株式会社、RLSAプラズマプロジェクトリーダー松岡孝明、野沢俊久のもと15名のメンバーが、同社関西テクノロジーセンター(尼崎市)および葦崎テクノロジーセンター(葦崎市)で開発に従事した。

#### 5 研究開発の推進

DIINプロジェクト「21世紀型顧客ニーズ瞬時製品化対応新生産方式の創出」において、1.顧客のニーズから瞬時にLSI設計を可能とするソフトウェアアクセラレーター技術、2.10GHzクロックをはるかに超える超高速LSIを実現するためのラジカル反応ベーストランジスタ形成技術、3.上記プロセスを実現するための装置、インフラ、ユーティリティ技術が上げられている。以下それらの開発が推進実施された。

##### 5.1 顧客のニーズから瞬時にLSI設計を可能とするソフトウェアアクセラレーター技術開発

システムLSIの設計短期間化には、論理設計・検証の部分の効率化が必須である。本プロジェクトでは動的再構成技術を用いて、ソフトとハードを融合した回路設計・検証手法の確立を目指した。実際のハードが出来上がる前に仮想的なハードウェアを模倣する技術、すなわち仮想プロトタイプに必要なパーソナル・エミュレータを開発した。本エミュレータを用いて、RTL検証、評価を行い、これまでに比べておよそ3桁高速なエミュレーションを実現した。そして高精細画像処理を含む高精度パターンマッチングアルゴリズムを実装した動的再構成プロセッサを設計した。

試作したLSIの開発期間は現状のLSI開発期間である28週を、4週間で実現し、大幅なLSI設計期間の短縮を実現し、当初の目標を実現した。<sup>4</sup>

## 5.2 マイクロ波励起高密度プラズマ絶縁膜形成およびエッチング装置開発

1980年に東京工業大学の後藤尚久教授(当時)により通信用アンテナとして発明されたRLSA(Radial Line Slot Antenna)は、銅の平板にTの字形状のスリットを多数所定の位置に設け、円偏波を放射するアンテナである。

“このアンテナならアンテナ直近の近傍電磁界の分布を正確に制御でき電子温度の低い均一なプラズマが励起できる”と考えた大見は、石英やアルミナの絶縁板の直上に大電力放射用に改良したRLSAを配置し、予想通りのプラズマ励起を実現した。

マイクロ波励起プラズマの特徴は、絶縁板直下の10~30mm程度の領域で高密度のプラズマが励起されるため、プラズマ励起に使われなかったマイクロ波は全反射され、チャンバ内部に侵入せず、プラズマ励起領域からチャンバ内部に拡散する拡散プラズマの電子温度が1eV程度ときわめて低くなることである。シリコン基板は電子温度の十分低い拡散プラズマ領域に設置されるため、イオン衝撃ダメージやチャージアップダメージがまったく生じないプラズマとなり、トランジスタ製造に使える世界で最初のプラズマ装置となった拡散プラズマ領域では、シリコン基板表面に流れ込む電子電流とイオン電流が、瞬時瞬時に等しいため、どの瞬間にプラズマを消してもシリコン基板表面に電荷が残ることがなく、チャージアップダメージは原理的に発生しない。さらにアンテナ形状や絶縁板形状等を最適化することにより、大口径にわたり均一かつ安定に高密度プラズマを生成させる技術が開発され、半導体製造装置の具体化の道が拓かれた。

シリコン基板表面の直接酸化、直接窒化用ラジカル発生のためにはプラズマ励起用ガスとラジカル生成用ガスのプラズマ励起領域への供給が必要であり、そのためにはアンテナ部分の直下に位置するセラミック製絶縁板に、50 $\mu$ m程度の直径のガス供給口を数千個配置してシャワープレートとし、均一にプラズマ励起用ガス及びラジカル生成用ガスをプラズマ励起領域に供給するようにした。

直接酸化用にはクリプトン/酸素(Kr/O<sub>2</sub>)ガスの組み合わせで効率よく酸素ラジカルを発生し、直接窒化用にはキセノン/アンモニア(Xe/NH<sub>3</sub>)ガスの組み合わせで(NH)<sup>\*</sup>ラジカルを発生させた。400~600という低温のラジカル反応で生成された酸化膜(SiO<sub>2</sub>)、窒化膜(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)はまさに驚異的な性能を発揮した。現状の熱酸化膜にくらべて、同じ膜厚(1~3nm)で同じ電圧を加えたときのリーク電流が1,000分の1以下に低減し、1/f雑音も2桁程度減少した。特に、初めて実現された直接窒化膜は電子やホールの移動度が2倍以上に増大し、信頼性・寿命に至っては30,000倍以上向上したのである。リーク電流増大に起因するスタンバイ時の消費電力急増で行き詰まり状況にある現状の半導体技術の活路を拓く成果となった。酸素ラジカル(O<sup>\*</sup>)やNH<sup>\*</sup>ラジカルを効率よく生成するのは、Kr、Xeであることは自然科学の法則で決まっている。産業用に使用するため、大見は高価なKr、Xeガスの回収・循環システムも同時に開発・実用化している。

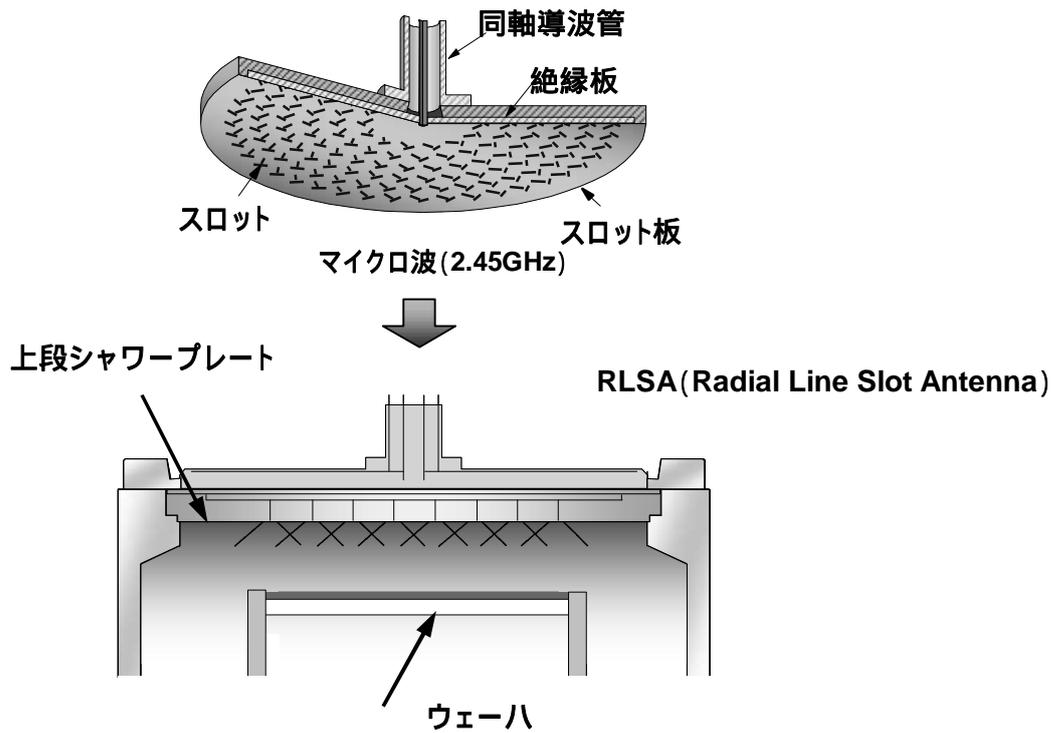


図 4 マイクロ波励起高密度プラズマ装置(提供:大見研究室)

図 4 にマイクロ波励起高密度プラズマ装置の概略図である。この装置は平成 10 年度通商産業省第三次補正予算プロジェクトとして、NEDO、東北大学、東京エレクトロンによる総額 5.4 億円の「大口径・高密度プラズマ処理装置」のプロジェクト名で実用化開発が行われた。そして東京エレクトロンは「Trias SPA」ゲート絶縁膜プラズマ窒化処理装置を発売した。この実用化成功により、2004 年に大見忠弘と東京エレクトロン社は第一回産官学連携連携功労賞者表彰 内閣総理大臣賞を受賞した。

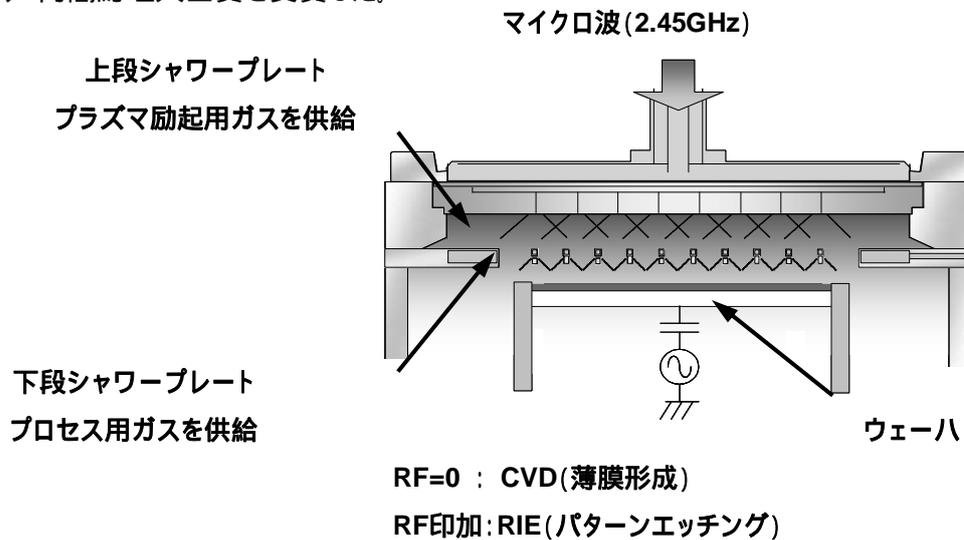


図 5 2段シャワープレートマイクロ波励起高密度プラズマ装置 (提供:大見研究室)

その後、このマイクロ波励起高密度プラズマ装置は、薄膜形成用並びにパターンエッチング用装置として、2段シャワープレート構造に発展した。図 6 のように、ラジアルラインスロットアンテナと上下二層のシャワープレートを備え、上部のシャワープレート部にアルゴン、クリプトンあるいはキセノンなどのプラズマ励起用ガス及び酸素ラジカル、水素ラジカルや  $\text{NH}$  ラジカル発生用の  $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{NH}_3$  といったガスを供給し、そして下部のシャワープレート部には薄膜形成やエッチング用の原料ガスを供給する。高密度プラズマの真っ只中に原料ガス供給用の下段シャワープレートを導入できるのは、このマイクロ波励起プラズマのように、マイクロ波によるプラズマ励起は上段シャワープレート直下 20～30mm 以内で行われ、それより下はきわめて電子温度の低い拡散プラズマ領域になっている場合においてのみ可能である。拡散プラズマ領域のプラズマ電位は 8～9v 以下と十分に低いため、下段シャワープレートの表面がイオン照射のスパッタにより絶対に削られないからである。原料ガスもきわめて電子温度の低い拡散プラズマ領域に供給されるため、過剰解離されることが無くどんなに細くて深いコンタクトホール、スルーホールの穴の底にも十分に輸送されるため、エッチング速度や穴埋め成膜速度といったプロセスの速度はパターンサイズに依存しない。すなわち、マイクロローディング効果がまったくない半導体製造装置が世界で初めて開発されたのである。<sup>5</sup>

このことが持つ意味はきわめて大きい。これまでの半導体製造装置は、エッチング速度、穴埋め成膜速度といったプロセス速度がパターンサイズに大きく依存した。すなわち、パターンが大きければプロセス速度は速いが、パターンが小さくなるにつれ、エッチング速度、穴埋め成膜速度は遅くなり、ついには穴が掘れず穴が埋められなくなって、くり返しくり返し大規模投資を要求された。これが半導体産業の宿命だと思われ続けて来た。かつては、2～3 百億円の投資で済んだが、今や数千億円の大規模投資をくり返し要求されて、もはや半導体産業は健全な産業ではないというところに追い込まれていた。この負の連鎖を断ち切る新技術が、マイクロ波励起高密度プラズマ装置である。



RLSA プロセスモジュール(PM)

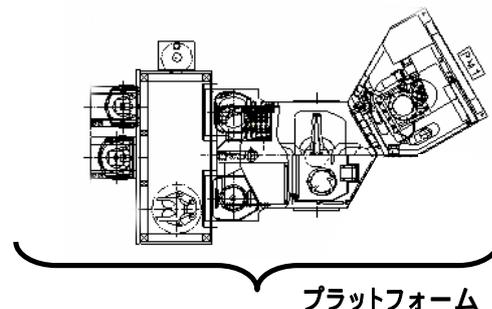


図 6 90nm 世代以降対応ゲート絶縁膜形成実験装置の構成と外観(提供:  
大見研究室)

マイクロ波励起高密度プラズマを用いたラジカル窒化酸化膜、直接窒化膜、および直接酸化膜を実用レベルの200mm/300mmウエーハ上で均一性良く形成するための実証実験装置を製作した。図6にそのゲート絶縁膜形成用実験装置の装置の構成と外観図を示す。<sup>6</sup>

また、水素ラジカル( $H^*$ )をきわめて効率よく発生させるガスの組み合わせである  $He/H_2$  を用いたマイクロ波励起高密度プラズマ装置に金属メッシュを入れることにより、 $He^+$ イオンの通過を抑制し、 $H^*$ ラジカルのみをウエーハに到達させることにより、イオン照射ダメージのまったくない  $H^*$ ラジカルシタリングが可能となった。 $N_2/H_2$  雰囲気 400℃、30 分の水素シタ工程は、製造工程に入った各種ダメージによるトランジスタのばらつきを低減する決定的に重要な工程である(1963年:米国ベル研究所発見)。しかし、ゲート絶縁膜が  $SiO_2$  から  $Si_3N_4$  に変わると  $H_2$  分子が  $Si_3N_4$  膜中を拡散できないため、 $H^*$ ラジカルシタが必須となるのである。

### 5.3 5.3 マイクロ波励起高密度プラズマ装置による極薄ゲート絶縁膜形成技術開発

シリコン基板上にゲート酸化膜の形成は、通常 800℃ 以上の高温熱酸化で形成されるが、デバイスの信頼性の問題から薄膜化が難しく、高速化、低消費電力化の妨げとなってきた。マイクロ波励起高密度プラズマ装置を用いることにより 400℃ という低温で高品質なシリコン酸化膜を得ることに成功した。 $Kr/O_2$  ガスの組み合わせで効率よく酸素ラジカル( $O^*$ )を発生し、この酸素ラジカルが酸化膜中を低温でも十分に拡散するため、低温でも高速の酸化が行える。得られた酸化膜の界面準位密度は熱酸化膜より低い値が得られている( $8 \times 10^9 eV^{-1} cm^{-2}$ )<sup>7</sup>。リーク電流は熱酸化膜にくらべて 1/1000 以下に減少している。

ゲート酸化膜を  $Kr/O_2$  プラズマによって 400℃ で形成した MOSFET を製作し、その半導体電気特性は、従来の高温熱酸化膜を用いた場合と同等以上の特性が得られ、1/f 雑音は 2 桁近く小さくなっている。

シリコンを直接窒化する窒化膜は、従来の熱プロセスでは良好な界面特性を得ることができず、デバイスとして利用できなかったが、マイクロ波励起高密度プラズマによるラジカルベースのシリコン直接窒化では良好な特性が得られることが分かってきた。高品質なゲート絶縁膜をラジカル反応で形成するには、ゲート絶縁膜形成前にベアシリコン表面を終端している表面終端水素を低エネルギーのイオン照射により除去することがきわめて重要である。ラジカル酸化やラジカル窒化は 400℃ から 600℃ 程度の温度で行われるため、終端水素がゲート絶縁膜中に残留して、膜質を劣化させるからである。そして  $Xe/NH_3$  プラズマを用い、窒化膜に応力が蓄積しない条件で膜を形成することが重要であることが判明した。

図 7 は従来の熱酸化膜とラジカル直接窒化膜、ラジカル直接酸化膜の EOT(Effective Oxide Thickness 実効酸化膜厚)と 1V 印加時のリーク電流を示したものである。熱酸化膜にく

らべてリーク電流が3桁低減され、特にラジカル窒化膜の場合は、ゲート電圧に対する寿命を3万倍以上に延ばすことができ、電流駆動力を4倍以上にできることを確認した。<sup>6</sup>

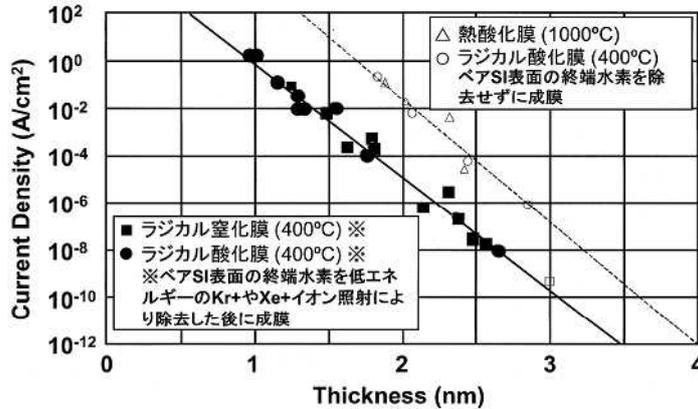


図7 熱酸化膜、ラジカル酸化膜及びラジカル窒化膜の1V印加時のEOTとリーク電流の関係(提供:大見研究室)

フラッシュメモリーはフローティングゲート電極にトンネル酸化膜を通じて電荷を書き込み、消去する不揮発性メモリーであり、その心臓部であるトンネル酸化膜にリークがあると記憶保持できない。図8はフラッシュメモリーの模式構造図と求められる性能を図示してある。

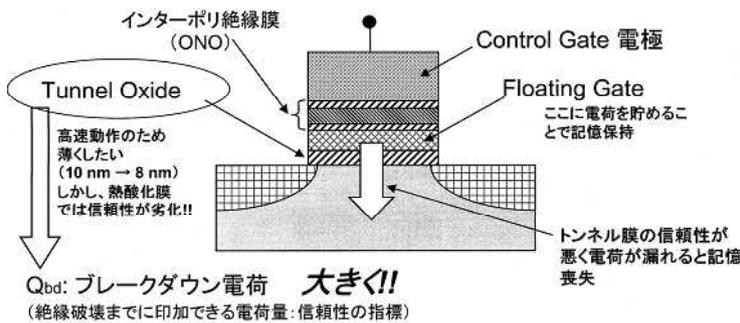


図8 フラッシュメモリーの模式図と求められる性能(提供:大見研究室)

これまでは、トンネル酸化膜は800 Å以上の熱酸化プロセスにより成膜されているが SILC (Stress Included Leakage Current) が大きく、トンネル酸化膜厚を10nm以下にすることができなかった。マイクロ波励起高密度プラズマによる原子状酸素ラジカル(Kr/O<sub>2</sub>)を使った400程度の低温ラジカル酸化膜のSILCは一桁程度低減する。さらに、Kr/O<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub>プラズマを用いた酸窒化膜(界面と表面に窒素が多く分布)のSILCは三桁程度低減されるため、トンネル絶縁膜厚の7nm以下への薄膜化の可能性が確認された。

#### 5.4 新しい結晶表面 Si(110)上の MOSFET 製作技術開発

これまでシリコンを利用した半導体デバイスはすべて Si(100)表面上に製作されてきている反応力のまったく無い酸素分子(O<sub>2</sub>)や水分子(H<sub>2</sub>O)を用いた高温熱酸化技術で、程々の品質の SiO<sub>2</sub> 膜が得られるのは Si(100)表面だけであることが、その理由である。集積回路に使われる回路は、低消費電力化の視点から、圧倒的に nMOS と pMOS を直列接続する CMOS である。(100)表面では、ホールの移動度が電子の移動度の 1/3 程度で、CMOS を構成する pMOS のゲート幅は nMOS の 3 倍程度になり、pMOS の劣悪な性能が(100)面 CMOS の性能をすべて律束してしまっている。他方、p 型 MOSFET の電流駆動能力を増加するには、Si(110)表面を利用すれば良いことが 1970 年以來報告されてきた。しかしながら、従来の熱酸化による方法では Si(110)表面上に高品質の絶縁膜を形成することができず、MOS デバイスを得ることができなかった。

マイクロ波励起低電子温度高密度プラズマにより、あらゆる面方位のシリコン表面上に文字通り超高品質の SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 膜を形成することができ、Si(110)表面上においても良好な MOSFET を製作することができ、(110)面上に形成された pMOS は(100)面 pMOS に比べて 3 倍の電流駆動能力を示すことが確認された。

Si(110)表面上の p-MOSFET と n-MOSFET の電流駆動能力がほぼ等しくなり、CMOS において、両者が同一の大きさで電流駆動能力がバランスすることを意味しており、スイッチング時にもオフセット雑音を発生しないアナログにも十分対応可能な Balanced-CMOS の世界が新たに切り拓かれることが実証された。(100)面 CMOS の場合には、負荷トランジスタの pMOS が並列構成になる NAND ゲート回路は、入力数が増えても論理回路の面積が極端に増加することはないため高速の動作速度が維持されたが、負荷トランジスタの pMOS が直列構成になる NOR ゲートは、入力数が増えると論理回路の面積が極端に大きくなり動作速度が急激に劣化する。結果として、(100)面 CMOS では NOR ゲートは使わずに NAND ゲートを中心に論理回路を構成しなければならない厳しい律束条件が存在した。

ラジカル反応によるゲート絶縁膜形成が実現されたことから Si(110)表面を利用することが可能となり、理想的な Balanced-CMOS の原理試作に成功した。要求される機能実現に必要な最適の論理ゲートの組み合わせが活用できるのである。図 9 に、Si(110)面完全対称構造トランジスタモード図を示した。

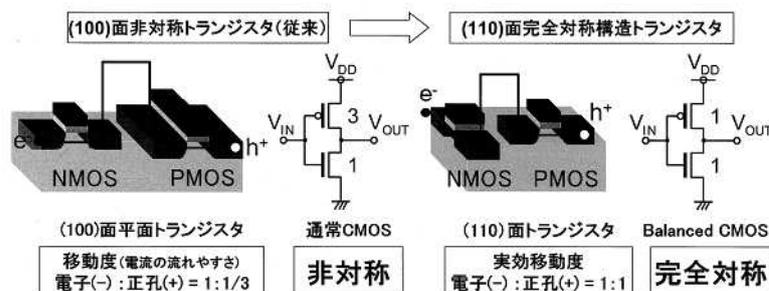


図9 Si(110)面完全対称構造トランジスター模式図(提供:大見研究室)

### 5.5 マイクロ波励起高密度プラズマによる高誘電率ゲート絶縁膜形成技術開発

半導体デバイスの高速化には MOSFET の電流駆動能力の向上が必須であるが、そのためには素子微細化と共に、MOSFET のゲート絶縁膜を薄くすることにより静電容量を大きくし、デバイスの高速化を計ってきたが、トンネル効果等によるゲート絶縁膜のリーク電流の急激な増大を招き、スタンバイ時の消費電力が急増してこれ以上ゲート絶縁膜薄膜化による高速化は不可能という深刻な問題となってきた。そこで薄膜化による静電容量を増大させる方法として、ゲート絶縁膜を従来の誘電率の低い  $\text{SiO}_2$  系材料から、高誘電率絶縁膜(High-k 絶縁膜)に転換することが求められている。これまで  $\text{HfO}_2$  系材料が有力候補として研究されてきているが、窒化物系の高誘電率材料が有望であることに大見は着目し、様々な窒化物系高誘電材料を比較検討し、比誘電率が 20 程度のプラセオジウム珪素化窒化物( $\text{Pr}_3\text{Si}_6\text{N}_{11}$ )に狙いを定めた。

まずシリコン表面に界面を完全に平ら化できる直接窒化膜  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜を EOT で 0.3nm 程度マイクロ波励起高密度プラズマ直接窒化により形成し、その上に 2 段シャワープレート構造の装置を用いて、Pr 有機化合物( $\text{Pr}(\text{EtCp})_3$ )と塩素を含まない Si 有機化合物( $\text{Si}[\text{N}(\text{CH}_3)_2]_4$ )を原料ガスとして下段のシャワープレートから供給して成膜した。プラズマ励起ガスとしては、Xe、Kr、Ar につき検討したが、Ar ガスではリーク電流が大きく、やはり電子温度が高いために起こるイオンダメージが原因と考えられる。リーク電流を徹底的に小さくし、ヒステリシスを無くすためには Xe ガスが有効であることを確認した。

EOT で 1.0nm 以下の膜厚のゲート絶縁膜が要求される 45nm 世代以降の集積回路には、 $\text{Pr}_3\text{Si}_6\text{N}_{11}/\text{Si}_3\text{N}_4$  の積層窒化膜がゲート絶縁膜としてもっとも有望である。

### 5.6 マイクロ波励起高密度プラズマによる低誘電率層間絶縁膜成膜技術開発

半導体デバイスの微細化が進み、回路が複雑化するにつれて、多層配線間で生じる寄生容量が、これによる配線遅延を起し、デバイス高速化の最大阻害要因となってきた。この寄生容量を低減させるための方策として層間絶縁膜を従来の  $\text{SiO}_2$  系材料より誘電率の低い、低誘電率絶縁膜(Low-k 絶縁膜)の開発が求められている。これまで有望な材料として SiOF(酸化シリコンにフッ素を添加したもの)、SiOC(酸化シリコンに炭素を添加したもの)、や有機膜系の材料が挙げられている。また誘電体を多孔質化することにより実効的な誘電率を下げる提案もなされているが多孔質化を進めるにつれて、シュリンク、強度低下、吸湿性などの重大な問題が生じ、実用化は殆ど不可能に近い。

層間絶縁膜形成には 400 程度以下の低温化が必須であるが、そのためにはプラズマで原料ガス分子の分解・反応による成膜が一般的である。プラズマを用いる場合、用いるプラズマ源によっては、原料分子を過剰に分解し、誘電率の高い層間膜ができてしまい、分解を抑える

ために投入するパワーを下げると成膜速度の低下が問題となる。

マイクロ波励起低電子温度高密度プラズマ技術を用いると、従来のプラズマ源が抱えていた問題をすべて解消し、良質の低誘電率膜の生成が成膜速度の低下を招来することなく実現できることが実証された。

具体的な材料としてフルオロカーボン膜(CFx膜)を選択し、SiCNバリアキャップ層/CFxピア低誘電率層/SiCN接着層/CFxトレンチ低誘電率層/SiCN接着層/SiO<sub>2</sub>ハードマスク層の構成の層間絶縁膜を製作し電氣的評価を行った。その結果空孔のないフルオロカーボン膜で比誘電率 2.2 を得た。成膜条件の最適化により、膜剥がれ・脱ガスをいっさい伴わず、比誘電率 1.9 を実現しうる可能性を見出した。

マイクロ波励起低電子温度高密度プラズマを薄膜形成やパターンエッチングに使用する時は、図5に示した2段シャワープレート構造の装置が活用される。薄膜形成用及びパターンエッチング用原料ガスは、下段シャワープレートから十分電子温度の低い拡散プラズマ領域に供給されるため、プラズマ中の電子と衝突しても原料ガス分子が過剰に解離されることがない。結果として、原料ガス分子はスルーホール、コンタクトホールの入口付近に吸着することなく、穴の底まで供給されるため、エッチング速度や穴埋め成膜速度がパターンサイズによらず一定になる。また上段シャワープレートのガス吹き出し部の構造を改良しプラズマ励起ガスがチャンバ内を均一に流れるようにすることにより、チャンバ内表面への付着物を大幅に減少させることができ、クリーニング時間が大幅に短縮しうる改善を得た。さらに膜厚均一性確保のために、格子状の下段シャワープレートにおけるガス穴の配置と格子間の開きを最適化し、膜厚均一性 3%という満足すべき値を得た。

## 5.7 マイクロ波励起高密度プラズマによる絶縁膜エッチング技術開発

LSIにおける製造工程において、所定の部分を取り除くエッチングプロセスは、初期の段階では溶液に浸漬するウェットプロセスが取られていた。その後微細加工の進展に伴いサブミクロン世代ではICP(Induction Coupled Plasma:誘導結合型プラズマ)やECR(Electron Cyclotron Resonance:電子サイクロトロン共鳴)ドライプラズマエッチングプロセスが広く使用されてきている。しかしながら従来のICPやECRプラズマ装置では高密度プラズマを生成すると電子温度も上昇するため、poly-Siのエッチングでは高密度領域ではノッチと呼ばれる異常形状の問題が発生し、SiO<sub>2</sub>エッチングにおいては、高密度プラズマではCF系のガスの過剰解離が起こり、十分なレジスト選択比が確保できないという問題が生じている。

マイクロ波励起高密度プラズマはプラズマ励起領域では高密度で電子温度もやや高いが、マイクロ波はこの高密度プラズマ中を伝播できず、プラズマ励起に使われなかったマイクロ波は、10~20mmの領域で反射される。プラズマは拡散によって、励起領域からウェーハ処理領域に輸送される、拡散プラズマ領域における電子温度は十分に低い。プラズマ励起領域で高密度にしておくことでウェーハ処理領域においても $1 \times 10^{11}$ 個/cm<sup>3</sup>台の高密度プラズマが維持される。これらのことより、原料ガス分子の過剰解離を抑制するためにはマイクロ波プラズマの

拡散領域に原料ガスを供給すれば良いことが推定される。従ってエッチング装置の基本構成としてプラズマ励起用上段シャワープレートとプロセスガス用下段シャワープレートを持つ 2 段シャワープレートマイクロ波励起高密度プラズマ装置が開発された。図 10 は 300mmウエーハ対応として開発されたマイクロ波励起高密度プラズマエッチング装置の全体写真である。本装置にはウエーハカセットに 300FOUP(Front-Opening Unified Pod: 正面開口式カセット一体型搬送、保管庫)を持ち、プロセスモジュールとしてゲート用と絶縁膜用のチャンバ 2 台を有し、それぞれ真空ロードロック装置を有している。

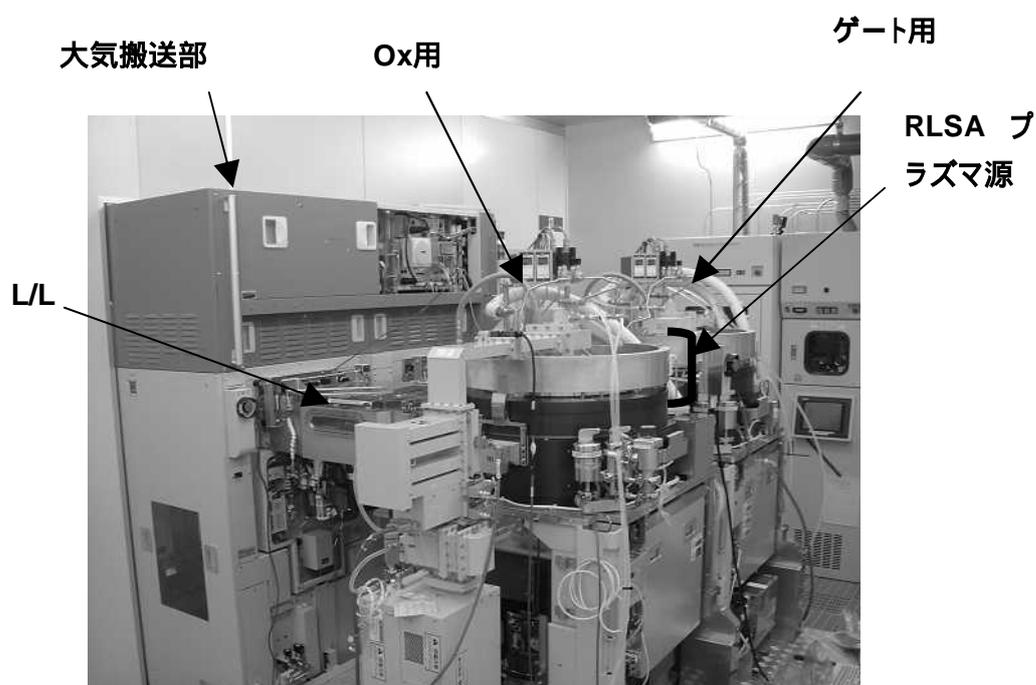


図 10 マイクロ波励起高密度プラズマエッチング装置(提供:大見研究室)

本装置においてプラズマ密度を 300mmウエーハ面内に均一にすることが求められる。マイクロ波は装置上端の誘電体板(上段シャワープレート)を伝播して真空装置の界面でプラズマを励起して吸収されるが、従来は誘電体板は平板構造を用いていたが、伝播方向に対して垂直な面では、マイクロ波吸収効率はチャンバ内のガス圧力が低くなるにつれて低下することが判明した。そして伝播方向に対して斜めの面を設けてそこからチャンバ内にマイクロ波を放出することによって共鳴吸収が起こり、プラズマへの吸収効率が大幅に向上することを見出した。この原理を応用して、チャンバに面した表面に軸対称構造に凹凸を設けた誘電体板を製作し、良好なプラズマ源の開発に成功した。この効果は極めて顕著で、プロセス条件としての圧力を 5-40mTorr の範囲においてエッチングの均一性が一定に保たれ、実用上極めて有効な装置が完成した。

半導体製造プロセスにおいてコンタクトホールエッチングという工程がある。これは電氣的な接続のためSiO<sub>2</sub>などの絶縁体に穴を開ける工程で、有機レジストをマスクにC<sub>4</sub>F<sub>8</sub>などのガスによるプラズマドライエッチングが用いられる。そして有機レジストと絶縁物とのエッチング選択比が15以上という値が要求される。従来のECR、ICP高密度プラズマでは高選択比のエッチングができなかった。この工程に、マイクロ波励起高密度プラズマエッチング装置を用い、エッチングガスにAr/O<sub>2</sub>/C<sub>5</sub>F<sub>8</sub>の混合ガスを使用し、Si基板上に成膜されたTEOS-SiO<sub>2</sub>膜にレジストパターンニングされたウエーハについてエッチングを行った。その結果、エッチング速度460nm/min、対レジスト選択比15を得、上面から見たホールの形状も良好でレジスト形状をそのまま転写できており、実用に供せられることが判明した。

さらに、SiNをマスクとして利用するSAC(Self Align Contact)エッチングにおいても対SiN選択比56という満足しうる結果を得、同様に実用化しうる見通しを得た。

## 5.8 その他の技術開発

本プロジェクトで得られたその他の要素技術成果について以下に列挙する。<sup>8</sup>

### (1) チャンバー内表面Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>保護膜開発

半導体製造装置では、さまざまなガスが使用される。エッチングやクリーニング用にはAlを激しく腐食する塩素系、臭素系のガスが多用されるため、完全な耐腐食性を備えた表面保護膜が必要となる。これまでは、水溶液を用いた陽極酸化によるアルマイト膜に封孔処理を施した保護膜が使われて来た。封孔処理されたアルマイト膜は大量の水分をチャンバ内に放出するため、大量のゴミを発生させると共に、エッチング時にレジストの選択比を低下させていた。本来必要とされる表面保護膜は水分をまったく放出しないで完全な耐腐食性を示す膜である。そこで完全で強固な被覆を行うための陽極酸化を行うために誘電率の低い有機溶剤(エチレングリコールやジエチレングリコール)を添加する技術、いわゆる非水溶液の陽極酸化法(電解質にアジピン酸を用いることでpHを7.0程度に維持)を開発し、電極間に水の電気分解を起こすことなく可能な限り高い電圧(1~400V程度)を印加することにより、無欠陥アモルファス構造でピンホールのない、緻密なバリア型陽極酸化膜(0.5μm程度のAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜)を得ることに成功した。3kg/cm<sup>2</sup>程度に加圧したNH<sub>3</sub>、Cl<sub>2</sub>、HBrのガス暴露評価試験を行い、本Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜は200、6時間でもなんら変化が見られず、完全な耐食性を有することが実証された。ついに、水分をまったく放出しない完全な耐食性を示すAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜がAl合金(AlMgZr)表面に実現されたのである。

### (2) 大排気量ポンプ開発およびKr、Xe回収循環装置開発

マイクロ波励起高密度プラズマでは、一般に用いられるArに比べて、Kr、Xeが多用される。狙い通りのラジカルを発生させられることと、Kr、XeはArにくらべて電子の衝突断面積が大きいため電子温度が低くできて、イオン照射によるダメージのないプロセスが行える。しかしKrはArに比べて1,000倍、Xeは10,000倍の価格であり、工業的に用いるにはこれらのガスの回収・再利用が不可欠であることから、回収循環装置を開発した。吸着剤のKr、XeとN<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>等の

ガスの吸着・脱離特性の圧力依存性の違いを利用し、流れ込んできたガスから Kr、Xe を分離・回収するのである。Kr、Xe を効率よく回収する最大の開発課題は、ブースタポンプ、粗引きポンプの開発であった。従来のポンプは、軽い水素ガスが排気できないため、20 /min、30 /min といった膨大な希釈ガスを流して水素を排気していた。こんなポンプを使ったのでは、Kr、Xe の回収率は絶対に高くできない。粘性流域から分子流域にまたがって、軽い水素ガスも含めてすべてのガスが同じ排気速度で排気できて、希釈ガスを必要としない不等リード・不等傾斜角のスクリーブースターポンプ、粗引きポンプの開発が必須であった。Kr、Xe の回収率は、それぞれ 99.9%、99.99% 以上である。

本ポンプは粘性流領域(760Torr)から分子流領域(1mTorr)まで、すべてのガスに対して一定の排気速度で排気可能な世界で初めてのポンプになった。本ポンプの開発により高価な Kr、Xe ガスの回収の実現が可能となった。この希ガス回収循環供給システムは半導体プロセスガスとしては世界初の連続回収循環再利用システムである。

### (3) 省エネチラーシステム開発

半導体製造装置の電力消費の半分は温度制御に使われ、1/4 はガス排気ポンプに使われている。各装置がチラーに冷凍機を内臓するシステムから、工場全体の冷却水システムの一体化により、温度制御電力を 1/8 以下に低減し、入口側と出口側のガスの圧縮比を 2 万以上に高めたスクリーブースターポンプの開発により、スクリーブースターポンプと粗引きポンプ内の排気ダクトの超小型化が行え粗引きポンプが小型化でき、ガス排気電力を 1/5 に低減した。

## 6 DIINプロジェクトの成果

### 6.1 NEDO評価委員会による評価

DIINプロジェクトとほぼ平行して実施されたNEDOプロジェクト「マイクロ波励起高密度プラズマ技術を用いた省エネ型半導体製造装置の技術開発」に関して、白木靖寛武蔵工業大学総合研究所長を分科会会長とする7名の分科会委員により対象プロジェクトの事後評価がなされた。

本技術開発は、日本で開発された RLSA 技術を高密度プラズマ発生源として応用し、その技術の特性を活かして半導体産業として発展させるもので、差別化できる技術と装置開発が行われたことは高く評価できる。プラズマ加工設備そのものの省電力化に加え、半導体の処理温度の低温化を可能にするとともに、複雑な工程を必要とする次世代システム LSI の歩留まりを向上して、新しいシリコン産業の創出を図る意気込みが感じられる。また、個別の目標に対する達成度も十分評価でき、その成果はシリコン半導体への大きなインパクト以外にも、化合物半導体、液晶や有機 EL を用いた平面型ディスプレイなどへの大きな波及効果も期待される。

なお、今後の課題として、成功した技術開発の奥にあるプラズマ生成・プラズマ応用の学術的理解を深めるため、理論的な側面からの検討が必要である。加えて、装置としての性能は

十分に実証されているので、早急に実デバイスでの作りこみや長期信頼性評価を行い実用化につなげて欲しい。その際、数値目標を達成するためのマネジメントの強化が望まれる、との総合評価がなされ、<sup>9</sup>プロジェクトとして成功したものと評価されている。

## 6.2 マイクロ波高密度プラズマ装置の製品化

RLSA マイクロ波プラズマ利用のゲート絶縁膜のプラズマ窒化装置「Trias™ SPA(トゥリアス エスピーエー)」が、2001年、東京エレクトロン株式会社から販売された。本装置は200mmウエーハへの対応が可能な製品である。さらに東京エレクトロンは2002年、300mmウエーハプロセスゲート絶縁膜向けプラズマ酸化・窒化装置の販売を開始した。<sup>10</sup>本装置は2005年の時点で10社を越えるLSIメーカーが採用し、ロジックLSIだけではなく、フラッシュメモリーやDRAMまで応用範囲を拡大しつつある。<sup>11</sup>

東京エレクトロンは2007年、RLSA事業部門を分割し、「東京エレクトロン技術研究所株式会社」を分社化し、RLSA事業に関し、一層の開発体制強化のため、専門事業会社を設立した。新会社は東北大学大見教授の近くの、仙台市の研究開発拠点と尼崎市、葦崎市の研究開発拠点において事業を行うことを発表した。<sup>12</sup>すでに枚葉式RLSAプラズマ成膜装置「Trias™ SPA」などの応用製品が量産ラインに導入されている。

関連記事として、東京エレクトロンが仙台市近郊の大和リサーチパークに30ヘクタールの工場用地を取得し、2010年に半導体エッチング装置の稼働を行うことを発表している。<sup>13</sup>

## 6.3 第2DIINプロジェクトのスタート

2007年DIINプロジェクトは初期の目標を達成したが、大見教授は、今後の更なる発展を目指し、産学連携の第2DIINプロジェクトを開始した。今後の更なる展開が期待される。

---

### 参考文献

<sup>1</sup> [http://www.niche.tohoku.ac.jp/index.php?page=project\\_fff](http://www.niche.tohoku.ac.jp/index.php?page=project_fff)

<sup>2</sup> <http://www.aomori-tech.go.jp/iss/aircnews/No1/5-15.pdf>

<sup>3</sup> 平成17・03・25産局第7号 高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム

<sup>4</sup> New Paradigm in Semiconductor Industry ( ) pJ3,(2006) NICHe, Tohoku University

<sup>5</sup> 垂井康夫編 「世界をリードするイノベーター 電子・情報分野の日本人10人」 p120 (2005)

<sup>6</sup> NEDO 「マイクロ波励起高密度プラズマ技術を用いた省エネ型半導体製造装置の技術開発」事後評価報告書 平成18年9月

<sup>7</sup> New Paradigm in Semiconductor Industry ( ) pJ30,(2006) NICHe, Tohoku University

<sup>8</sup> 第1回「マイクロ波励起高密度プラズマ技術を用いた省エネ型半導体製造装置の技術開発」(事後評価)分科会資料5-3(2006)

<sup>9</sup> NEDO「マイクロ波励起高密度プラズマ技術を用いた省エネ型半導体製造装置の技術開

---

発「事後評価報告書(2006)

<sup>10</sup> 東京エレクトロプレスリリース 2002年7月12日

<sup>11</sup> 日経マイクロデバイス 2005年5月

<sup>12</sup> 東京エレクトロプレスリリース 2007年5月11日

<sup>13</sup> 日本経済新聞 2007年3月8日