## 平成29年度

# 戦略的基盤技術高度化·連携支援事業 戦略的基盤技術高度化支援事業

「マイクロ波励起プラズマを用いた 低ダメージ薄膜形成用ミニマル装置の開発」

研究開発成果等報告書

## 平成30年5月

- 担当局 東北経済産業局
- 補助事業者 公益財団法人みやぎ産業振興機構

目 次

第1章 研究開発の概要	• • • • P.1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	••••P.1
① 研究開発の概要及び背景、当該分野におけ	<sup>†</sup> る研究開発動向 ••••P.1
② 研究開発の高度化目標及び技術的目標値	••••P.8
1-2 研究体制	••••P.10
1-2-1 研究体制	••••P.10
1-2-2 管理員及び研究員	••••P.10
1-3 成果概要	••••P.12
1-4 当該研究開発の連絡窓口	••••P.13
第2章本論	••••P.14
【1】 低環境負荷・省エネ・低コスト半導体製造装置	置技術の開発・・・・P.14
【1-1】 小型マイクロ波導波路・電源系の開発	••••P.14
【1-2】 高効率基板加熱システムの開発	••••P.17
【1-3】 チャンバクリーニングシステムの開発	••••P.18
【1-4】 小型除害システムの開発	••••P.20
【2】 低ダメージ・高品質シリコン窒化膜 CVD 用こ	プラズマ生成技術の開発 ・・P.23
【2-1】 磁場閉じ込め小型プラズマ源の開発	••••P.23
【2-2】 高密度プラズマ生成技術の開発	••••P.27
【2-3】 高速・高精度圧力制御システムの開発	••••P.28
【2-4】 高品質シリコン窒化膜形成システムの開発	••••P.30
【3】 小型化	••••P.33
第3章 全体総括	••••P.37

#### 第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

①研究開発の概要及び背景、当該分野における研究開発動向

#### <u>研究開発の概要</u>

半導体に技術は、エレクトロニクス産業のみならず自動車、環境、省エネ、医療 など多くの産業分野の発展の要である。現在まで、半導体にの製造は量産効果によ る低コスト化の観点から、大規模工場(メガファブ)での大量生産が主流となって いた。このため、莫大な設備投資資金が必要となり、現在、半導体にを生産できる 企業は世界でも数社と限られてしまっている。一方近年、電子機器の高機能化と消 費者のニーズの多様化に対応した多品種少量生産プロセスの半導体デバイス生産シ ステム(ミニマルファブシステム)が提案され、低コスト装置から構成される革新 的デバイス製造プロセスとして大いに期待されている。ミニマルファブが実現すれ ば、多くの企業がより少ない設備投資で半導体に製造に参入可能となり、低迷して いる日本のエレクトロニクス分野の競争力の再構築に多大な貢献が期待できるため である。現在まで、半導体にの基本技術となるシリコンCMOS回路を作製するた めのミニマルファブ装置及びプロセスの開発が行われてきており、デバイス寸法は 1μm程度と大きいながらも、最近ついに全てミニマルプロセスを用いた CMOSの 試作に成功している。ミニマルファブシステムの今後のさらなる進展が強く期待さ れる。

本研究開発では、CMOS 回路のさらなる微細化・高性能化に必須となる、シリコ ン窒化膜形成用プラズマ CVD 技術をミニマル化したプロセス装置を実現する(図 1参照)。そのために、東北大学で長年培ってきたマイクロ波励起高密度プラズマプ ロセス技術を基本とする。本技術は、反応性の高い活性種を自在に励起させ、低 温・低ダメージでのプロセスが可能であることを特長としており、メガファブにお ける大口径ウェーハを用いた半導体生産工程においてはすでに導入されている技術 である。よって、この技術をミニマルファブシステムに導入することが強く望まれ た。

しかしながら、プラズマは非常に拡散しやすいため、メガファブで用いられる高

密度プラズマシステムを単純にダウンサイジングしても、チャンバ壁でのプラズマ 消失の寄与が大きくなり、高密度なプラズマの維持が難しくなるという困難がある。 そこで、本研究開発において、新規な磁場閉じ込め機能を追加することで、高密 度・小型サイズのプラズマ励起を実現し、ミニマルファブシステムに適合した低 温・低ダメージな高品質薄膜形成技術を具現化し、高性能半導体 IC 生産用のミニマ ルファブ実現に寄与する。



図1: プラズマ CVD 装置のミニファブ化とその波及効果

本システムの開発は、シリコン CMOS の微細化・高性能化に寄与するのみなら ず、ALD(Atomic Layer Deposition,原子層堆積法)技術や反応性スパッタへの 展開も可能であり、シリコン CMOS のみならず、パワーデバイス、発光デバイス等 の新たな高性能デバイス開発及び製造への貢献も期待できる。

## 新技術を実現するために解決すべき研究課題

- (七)表面処理に係る技術に関する事項
- 1 表面処理に係る技術において達成すべき高度化目標

(3)川下分野横断的な共通の事項

①川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

イ.形成プロセスの微細化・精密化

力. 生産性向上・低コスト化

上記を実現するために、機能面、プロセス面、対応すべきデバイス面から課題の 分析を行い、研究開発テーマを以下のように設定した。



図 2:課題分析と研究開発テーマ

#### 研究開発の背景

### <u>ミニマルファブの意義</u>

ミニマルファブシステムにおける特徴の一つは、メガファブシステムでは柔軟に 対応できない小回りの効いたデバイスの生産および生産効率の向上であり、低コス ト、省スペース、更に省エネ等、様々なメリットが期待できる。近年、ミニマル ファブプロセスを用い、シリコン半導体 IC の基本回路である CMOS の作成に成功 している[図 3 (a) 参照]。CMOS 回路を実現することで、アナログやディジタル の様々な回路を低消費電力で形成可能となる。これにより、消費者ニーズに応じた 多種多様な半導体IC、例えば車載用マイコン、携帯電話用LSI、家電製品用システムLSI等の多品種少量生産に対応が可能となり、ミニマルファブシステムの市場拡大に大きく寄与することができる。

#### CMOS 製造プロセスにおける微細化・高性能化技術導入の必要性

しかしながら、ミニマルファブで現在実現している CMOS 回路のデバイス寸法 は 1 µm 程度と、メガファブで大口径ウェーハを用いて作成される寸法 0.1 µm 以 下の微細デバイスと比較するとその寸法は大きい。よく知られている通り、半導体 デバイスはデバイス寸法を微細化することでその低消費電力化・高速化が可能とな るため、今までの半導体 IC の性能向上はデバイス寸法の微細化と共に進展してき

た。よって、ミニマルプ ロセスにおいてもデバイ ス寸法の微細化を行うこ とが、今後のミニマル ファブシステムの発展に おいて極めて重要であ る。図3(b)に示すような サブミクロン微細化対 応・高性能化フルミニマ ル CMOS を実現させるに は、大口径ウェーハプロ セスで培ってきたいくつ かの技術をミニマル化す る必要がある。



図 3: (a)現在のフルミニマル CMOS と(b)サブミクロン微細化 対応・高性能化フルミニマル CMOS。

## シリコン窒化膜低温形成技術開発の必要性

ミニマル化が必要な技術の中で極めて重要な開発項目の一つが、ゲート電極側壁 に高品質なシリコン窒化膜サイドウォール [図3(b)参照]を導入することである。 このシリコン窒化膜サイドウォールは、デバイスの微細加工を行うために導入され たセルフアラインコンタクトプロセスを行う際に必要となるものであり、その高品 質化・低温成膜化が強く要求されている。なぜなら、デバイスの微細化・高性能化 行うためには、セルフアラインコンタクトプロセス以外にも、図3(b)に示すように シリサイド(シリコンと金属の化合物)や High-k 絶縁膜及びメタルゲート技術等の 様々な技術を導入する必要があり、高温にしてしまうとどうしてもそれらの特性が 劣化してしまうからである。シリコン窒化膜サイドウォールは、前述したセルフア ラインコンタクトプロセスにおいて、コンタクトホール形成の際のシリコン酸化膜 エッチングの際のストッピング膜に使われている。このシリコン窒化膜の形成温度 を下げると、結合の弱い品質の悪い膜になってしまい、ストッパーの役割を果たせ なくなり、微細加工が不可能となってしまう。また、成膜後のプロセス工程で多用 されるフッ酸洗浄等のウェット洗浄工程でエッチングされないようにしなくてはな らない。故に、シリコン窒化膜の成膜温度の低減と高品質薄膜形成の両立が必須な のである。

#### プラズマ CVD 装置開発の必要性

高品質シリコン窒化膜の成膜形成を実現するには、成膜材料ガスをプラズマ化し 活性化させるプラズマ CVD を用いることが有効であり、大口径ウェーハプロセス においてもプラズマ CVD 技術、もしくはプラズマ ALD(原子層堆積法)が用いら れ、現在でも膜質向上の研究開発が続いている。ミニマルファブ装置においても、 高品質な薄膜形成が可能なプラズマ CVD 装置の実現が強く求められる。

プラズマ CVD において高品質な薄膜を形成するには、(1)プラズマを高密度化 して活性なラジカルを大量に発生させるとともに、(2) 過度の高エネルギーイオ ン照射による基板へのダメージを抑制する必要がある。まず、プラズマを高密度化 させるには、プラズマ励起に用いる電力の周波数が高いマイクロ波を用いることが 有効である。現在、ミニマルファブシステムにおいてシリコン酸化膜を形成するプ ラズマ CVD システムが実現しているが、マイクロ波は採用せず、13.56MHz の 励起電力を用いた誘導結合型プラズマ源である。よって、ミニマルファブシステム において、マイクロ波励起プラズマを用いたプラズマ CVD システムを実現させる ことは重要である。基板へのダメージを抑制することに関しては、大口径ウェーハ 用のプラズマプロセス源において現在でも重要な開発テーマとなっている課題であ

## 磁場閉じ込め型プラズマ CVD 装置開発の意義

高密度プラズマをミニマルシステムで実現するには、大口径ウェーハ用装置での 開発とは異なる難しさがある。すなわち、プラズマはそのサイズが小さいと、処理 室(チャンバ)の壁が近いため壁への拡散でプラズマ密度が減少しやすく、高密度 なプラズマを維持することが困難となる。申請者(SL)は、博士課程においてプラ ズマ生成・診断技術(電子サイクロトロン共鳴(ECR)を用いたミラー磁場プラズ マ)を研究し[1]、その後東北大学においてマイクロ波励起プラズマを用いたシリ コン半導体製造プロセス技術に携わってきた[2]。そして、上記のような状況に鑑 み、ミラー磁場 ECR プラズマを用いた新たなプラズマ CVD 技術を着想し、最近 特許出願を行った[3]。本研究開発により、高密度かつ低ダメージな小型プラズマ 源を開発し、ミニマルファブシステムに対応させた新たな磁場閉じ込め型マイクロ 波励起プラズマ CVD 技術を開発することで、ミニマルプロセスによる高性能半導 体 C 製造技術の確立に大きく寄与できる。

(参考文献)

る。

[1]T. Goto et al., "Ion diffusion in a velocity space induced by Alfvén ion cyclotron mode observed in a mirror plasma," Physics of Plasmas, 7
(2000) p. 2485

[2] T. Goto, et al., Damage-free microwave-excited plasma etching without carrier deactivation of heavily doped Si under thin silicide layer", J. Vac. Sci. & Technol. A, 26 (2008) p. 8.

[3] 特願 2015-516943 後藤哲也、プラズマ処理装置およびプラズマ処理方法

## 当該分野における研究開発動向

前述したように、フルミニマルプロセスにより、シリコン半導体 IC の基本回路で あるシリコン CMOS が最近完成し、ミニマルファブシステムの今後の進展におい

 $\mathbf{6}$ 

ては、そのデバイスの微細化・高性能化が求められる。現在、フルミニマルプロセ スで作成した CMOS はデバイス寸法が 1 μm 程度と大口径ウェーハプロセスで生 産されるデバイス寸法に比べ大きく、また、たとえばドーパント制御も現在主流の イオン注入ではなく固相拡散を用いるなど、古典的なプロセスが採用されている。 今後はこれらプロセスを改良していく必要がある。図4に、ミニマルプロセスで作 製する CMOS において、今後の高性能化にとって必要となるプロセス工程を、現 在完成したフルミニマル CMOS との比較も併せ示す。

ŧ	支術項目	現在のフルミニマル CMOS (デザインルール1µm)	サブミクロン微細化対応・高性能化 フルミニマルCMOS (デザインルール0.18~0.25μm)		
IJ	ソグラフィ	デジタルミラーデバイス (DMD)	DLP方式 1/4露光、電子ビーム描画		開発中
ゲート	材料	アルミニウム(スパッタ)	ポリシリコン(CVD)	┣	開発中
電極	側壁構造	無し	<i>シリコン窒化膜サイドウォール (プラズマ</i> CVD)	<b> </b>	本研究開発テーマ
	ドーピング手段	固相拡散	イオン注入	←	開発済
- ソース ドレイン	低抵抗化手段	無し	シリサイド(CoSi等)	┣	要素技術開発済
構造	コンタクト電極 材料	アルミニウム	TiNスパッタ+ タングステンCVD		要素技術は開発済 (CVDは開発中)
配線	層間絶縁膜	熱酸化膜	プラズマCVD酸化膜(TEOS)	┣	開発済
構造	配線構造	1層アルミニウム	多層Cu配線(ダマシンプロセス)	┣	開発中
短チ	・ャネル効果 叩制手段	無し	イオン注入によるLDD(Light Doped Drain)、SDE(S/D Extension)、 ポケットインプラ	-	要素技術は開発済

図4:ミニマル CMOS の微細化・性能向上へ向けたプロセス変更点

図 4 に示す通り、微細デバイスをミニマルで実現するために必要な要素技術は全 て開発中、もしくは開発済である。その中でサイドウォール用シリコン窒化膜の開 発は現在まで行われていない。ミニマルシステムにおいて、磁場閉じ込め型の小型 の高密度プラズマ励起技術を実現し、高品質のシリコン窒化膜の低温形成技術の確 立を行う、本研究開発の推進が極めて重要である。 ②研究開発の高度化目標及び技術的目標値

表面処理に係る技術に関する事項における高度化目標

- イ.形成プロセスの微細化・精密化
- キ.生産性・効率性の向上

#### 【1】 低環境負荷・省エネ・低コスト半導体製造装置技術の開発

【1-1】小型マイクロ波導波路・電源系の開発

プラズマ励起に用いるマイクロ波の波導波路系を小型化し、<u>導波管サイズを</u> 35mm×16mm(規格WRJ-7)としたマイクロ波導波路系を実現し、<u>反射電力</u> 10%以下のプラズマ励起を実現した。

【1-2】高効率基板加熱システムの開発

成膜時の基板が 400℃以下の高効率基板加熱ステージを開発した、<u>加熱状態での</u> 使用電力は 150W 以下となった。

【1-3】チャンバクリーニングシステムの開発

プラズマ CVD チャンバにおいてはチャンバ内壁にも膜が付着するため、付着物 除去効率 99%以上の SF<sub>6</sub>ガスを用いたクリーニングシステムを構築した。

【1-4】小型除害システムの開発

シリコン窒化膜形成においては、シランガス、アンモニアガス、さらにはクリー ニング用の SF6 ガスを用いる。これらガス成分を除去する、吸着剤を用いた、<u>除</u> 去効率 99%以上の小型除害システムを構築した。

## 【2】低ダメージ・高品質シリコン窒化膜 CVD 用プラズマ生成技術の開発

【2-1】磁場閉じ込め小型プラズマ源の開発

プラズマ閉じ込め促進のため、最適な磁場構造を見出す。<u>最大磁場強度 3000 ガ</u> ウス以上、プラズマサイズ 100 mm×100 mm×150 mm以下のプラズマ源を実現し

た。

【2-2】高密度プラズマ生成技術の開発

開発した小型プラズマ源を用い、<u>プラズマ密度 10<sup>11</sup>cm<sup>-3</sup>以上</u>の高密度プラズマ 生成技術を開発した。

【2-3】高速・高精度圧力制御システムの開発

チャンバへのガス導入構造、圧力制御機能を導入し、プロセスガスを導入した後に、<u>圧力が10秒以内で安定する</u>高速・高精度圧力制御システムの開発を行った。

【2-4】高品質シリコン窒化膜形成プロセスの開発

開発した小型・省電カプラズマ励起システムを用い、イオン照射ダメージを低減 させるとともに窒化種ラジカルを大量に基板へ供給し、<u>400℃以下で5%HF溶液</u> でのエッチングレートが4nm/min以下の高品質シリコン窒化膜を形成できた。

## 1-2 研究体制

## 1-2-1

補助事業者(事業管理機関)



#### 1-2-2 管理員及び研究員

【補助事業者】 みやぎ産業振興機構

氏名	所属·役職		
熊谷実	産業育成支援部	部長	
清正 真砂	産業育成支援部	地域連携推進課	課長
石川仁	産業育成支援部	地域連携推進課	課長補佐
小野寺 桂三	産業育成支援部	地域連携推進課	技術力向上専門員

#### 【間接補助事業者】(研究機関)

(株) コーテック

氏名		所属・役職
小林	誠治	営業技術部 部長
끼ㅁ	浩邦	技術部主任技師
金澤	民雄	技術部主任技師
山口	英彰	装置技術部課長
佐藤	恵一朗	装置技術部

国立大学法人東北大学

氏名	所属・役職
後藤哲也	未来科学技術共同研究センター 准教授

誠南工業(株)

氏名	所属・役職
薮田 勇気	技術部部長
水口 寿史	技術部 主任
山本 直子	技術部 開発課
孫宇	製造部組立課 課長
佐藤 亮	製造部組立課 課長

## 【アドバイザー】

氏名	所属・役職
井上 道弘	国立研究開発法人産業技術総合研究所 九州産学官連携セン
	ターを員研究員
中隈信治	ルネサスセミコンダクタマニュファクテュアリング株式会社
	技術統括部 プロセス装置技術部 装置技術1課 課長

#### 1-3 成果概要

- 【1】低環境負荷・省エネ・低コスト半導体製造装置技術の開発
- 【1-1】小型マイクロ波導波路・電源系の開発
- 小型化マイクロ波電源システムの組込みによるミニマル CVD 装置の完成
- 【1-2】高効率基板加熱システムの開発

基板温度 400℃、加熱状態の使用電力 150W 以下を達成

【1-3】チャンバクリーニングシステムの開発

付着物除去効率 99%以上の SF6 ガスを用いたクリーニングシステムを構築

【1-4】小型除害システムの開発

除去効率 99%以上の小型除害システムを構築

【2】低ダメージ・高品質シリコン窒化膜 CVD 用プラズマ生成技術の開発

【2-1】磁場閉じ込め小型プラズマ源の開発

プラズマサイズ 100 mm×100 mm×150 mm以下を実現

【2-2】高密度プラズマ生成技術の開発

プラズマ密度 1011cm-3 以上を達成

【2-3】高速・高精度圧力制御システムの開発

圧力安定化時間 10 秒以内を実現

【2-3】高速・高精度圧力制御システムの開発

圧力安定化時間10秒以内を実現

【2-4】高品質シリコン窒化膜形成プロセスの開発 基板温度 400℃以下で 5%HF 溶液でのエッチングレートが

4nm/min 以下の高品質シリコン窒化膜を形成

### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理機関】

公益財団法人 みやぎ産業振興機構

産業育成支援部 地域連携推進課 小野寺 桂三

**〒**982-0011

宮城県仙台市青葉区上杉 1 丁目 14 番地2号

TEL: 022-225-6638 FAX: 022-263-6923

E-mail: koudo@joho-miyagi.or.jp

【研究機関】

(株)コーテック

営業技術部 部長 小林 誠治

**T**981-1231

宮城県名取市手倉田字八幡486-1

TEL:022-381-4621 FAX:022-381-4622

E-mail: <u>s\_koba@ko-tec.co.jp</u>

#### 第2章 本論

図5に開発する磁場閉じ込め型ミニマルプラズマ CVD 装置の図と、対応する研究開発テーマ を示し、以下に研究開発の具体的実施内容について述べる。



図 5:開発する磁場閉じ込め型ミニマルプラズマ CVD 装置と研究開発テーマの対応

#### 【1】低環境負荷・省エネ・低コスト半導体製造装置技術の開発

#### 【1-1】小型マイクロ波導波路・電源系の開発

小型マイクロ波導波路系・電源系の開発に関する、平成27年度の検討内容を図6に示す。 半導体プロセスで用いるマイクロ波励起プラズマでは、通常周波数2.45GHzのマイクロ波が用 いられる。しかし、2.45GHzのマイクロ波は波長が長く、用いる導波管サイズも109mm×55mm となり、ミニマル装置への導入が難しい。そこで、寸法が小さい35mm×16mmの導波管(規 格WRJ-7)で使用するマイクロ波周波帯において、プラズマ励起源が製作可能か検討をおこ なった。このサイズの導波管で使用可能なマイクロ波周波数領域は4.9~7GHzである。電源 メーカーと打ち合わせをした結果、周波数5.85GHzのマイクロ波電源は、200W程度のものな ら小型化電源の製作に見通しが立つことが分かった。さらに、周波数5.8GHzに対応するECR 磁場強度は2100ガウスであるが、このECR磁場強度に応じて適切なミラー磁場配位を永 久磁石で形成可能であることが分かった(磁石構造等については2-1で述べる)。また、導波 路系もチャンバ導入部まで含めて設計に目途がたった。これらの検討より、周波数は 5.85GHzと決定した。

平成 28 年度においては、プラズマ励起時の反射電力を評価した。図7は製作したプラズ

14

マ励起チャンバの概要図とプラズマを励起した際の写真である。写真に示すように、磁場に閉 じ込められたプラズマの励起に成功した。この時のプラズマ励起条件は Ar ガス 14sccm、圧 力 1.33Pa、マイクロ波パワーは 35W である。図 8 に、ラングミュアプローブ(詳細は後述)で測 定したプラズマからのイオン飽和電流、反射電力のマイクロ波パワー依存性である。図から分 かるように、40W のマイクロ波を投入し、10mA/cm2 以上のイオン飽和電流が得られている 条件においても、反射電力は 0.1W 以下と、反射電力は 1%以下であることが分かった。以上 より、反射電力 10W 以下のプラズマ励起が実現した。同時に、マイクロ波導波路設計やチャ ンバ設計が適切で効率良くプラズマが励起させていることを確認した。

平成 28 年度においては、マイクロ波電源部の更なる小型化、及び自動整合器の導入を 行った。当初、マイクロ波電源は最大 200W のものを製作したが、プラズマ励起実験やシリコン 窒化膜の成膜実験を行ったところ、非常に効率良いプラズマ励起が実現したため、電力は 50W あれば十分という結論に達した。そこで、当初の電源サイズの半分程度(体積 0.5L 程 度)である、50W 電源を導入した。さらに、最大電力が 50W と、当初予定であった 200W より 低減できたことから、小型の自動整合器の製作にも目途が立ち、平成 29 年度に、同軸型の 自動整合器を導入した。

項目	仕様	備考
磁場発生方式	永久磁石 (Ne-Fe-B磁石)	電流コイルを用いず小型化
最大/最小磁場強度	4300/850ガウス	ミラー比(最大/最小磁場強度)=5.1
マイクロ波周波数	5.8~6.0GHz (波長50mm)	通常用いられる2.45GHz(波長122mm) に比べ短波長化
ECR磁場強度	2071~2143ガウス	強磁場強度は閉じ込め 性能が向上する方向 (2.45GHzだと875ガウス)
伝送部マイクロ波 導波管サイズ	35mm × 16mm (WRJ- 7)	マイクロ波周波数を上げることで 小型導波管が使用可能 (2.45GHzだと109mm×55mm)
マイクロ波チャンバ 導入部	TE11モード円形導波 管	現状は直線偏波、円偏波も導入可能
整合方式	3スタブチューナー	反射電力1%以下 (現状手動)
電源定格	100W	現状、4W程度以上でプラズマ励起できる ことを確認

ミニマル化対応ミラー磁場ECRプラズマ源の主な仕様

図 6 ミニマル化対応ミラー磁場 ECR プラズマ源平成 27 年度の検討内容



図7 製作したプラズマ励起チャンバの概要図と写真



反射電力は、スタブチューナーを調整することで、投入パワー5~80Wに対し、0.1W以下(測定下限以下)であった。(反射電力1%以下)

反射電力10%以下のプラズマ励起を実現した。

#### 投入パワー依存性

図8 ラングミュアプローブで測定したプラズマのイオン飽和電流及び反射電力の



図 9 50W 小型マイクロ波電源と自動整合器。

## 【1-2】高効率基板加熱システムの開発

成膜する基板の温度は400℃以下とする。ミニマルファブ規格の基板形状、搬送形状に合わ せ熱設計を行い、チャンバ壁への無駄な熱流を防ぎ、効率的に基板加熱を行うシステムを平 成27年度に設計した。設計した仕様を図10に示す。平成28年度には、実際に。基板ス テージを実際にチャンバに設置し、ステージを加熱し、ステージ温度と加熱状態にした際の使 用電力を測定した(図11)。その結果基板温度400℃の時の使用電力は37Wであることが 分かり、目標値である150W以下を達成した。



図 10 高効率基盤加熱システムの仕様



図 11 基板加熱システムの使用電力評価

#### 【1-3】チャンバクリーニングシステムの開発

プラズマ CVD チャンバにおいては、チャンバ内壁にも膜が付着することは避けられない。基板 へのパーティクル汚染の防止や、成膜性能の再現性を得るためにプラズマクリーニングシステ ムの構築は必須である。シリコン窒化膜を成膜するチャンバでは SF。ガス等のハロゲン系ガス でプラズマ励起を行い堆積膜を揮発させることでチャンバクリーニングを行う。本検討では、 SF。ガスと同等のクリーニング性能を有する NF。ガスを用い、プラズマクリーニングの評価を 行った。図 12 に、平成 29 年度において行ったプラズマクリーニングの様子である。図に示す ように、チャンバ窓に付着したシリコン窒化膜が、プラズマクリーニングにおいて揮発し、クリーニ ングされていることを確認した。次に、クリーニングの効果をより定量的に評価するため、シリコ ン窒化膜を付けたウェーハをチャンバ内へ設置し、プラズマクリーニングを行い、膜の減少量を 測定した(図 13)。その際に、クリーニング条件(プラズマ条件)も、F ラジカル発光強度を測定 することで、最適圧力を探った。その結果、0.67Pa で最適であることを見出し、その圧力にお いて評価を行った。図より、毎分約 30nm でシリコン窒化膜は揮発していることが分かり、トータ ルの成膜時間に使った時間とほぼ同じ時間クリーニングすることで、シリコン窒化膜は完全に 除去できることが定量的に明らかとなった。以上より、除去効率 99%以上プラズマクリーニン グ技術を確立することができた。

#### ◆現状

東北大学に設置したミニマル装置において、Ar/NF3プラズマクリーニングの効果は確認。



図 12 チャンバクリーニングシステム実施状況



図 13 チャンバクリーニングシステム評価実験結果

#### 【1-4】小型除害システムの開発

シリコン窒化膜形成においては、シランガス、アンモニアガス、さらにはクリーニング用の SF。ガ ス等のハロゲンガスを用いる。これらガス成分を除去するため、ドライポンプ出口の排気口に吸 着剤を導入した小型除害システムを構築した。平成 27 年度に、図 14 に示すように、シラン 系ガスを使用するプロセス時と、ハロゲン系ガスを使用するクリーニング時に適用する除害剤 を選定した。平成 28 年度には、高効率除去が可能となるようにガス流路や吸着剤の量・設 置位置等を検討し、図 15 に示すような除害筒を製作した。平成 29 年度には、製作した除 害筒を用いて実際の薄膜形成時及びクリーニング時における除害性能を評価した。評価に は、除害システム排気口に FT-IR(フーリエ変換赤外分光光度計)を設置することで排気ガス 成分を分析することで行った(図 16)。除害筒を通過させた直後に、シランガスが除害筒内の 除害材に吸着し、排気ガス中のシランガスの濃度がほぼゼロになっていることが分かる。このよ うにして評価した除去効率を図 17 に示す。図 18 に示すように構築した除害システムは、除 去効率 99%以上であることを確認した。

#### 大陽日酸株式会社殿と協議し、現在下記の検討結果を得た。

【対象プロセス及び使用ガス条件】

- > SiN成膜時 Ar (1sccm)/SiH4(0.1~0.5 sccm、除害筒部では 0.1%) / N2(3sccm) / H2(0.8sccm) プロセス時間 3分間
- クリーニング時 Ar(2sccm)/NF3(4sccm、除害筒部では F2換算 1.5%) プロセス時間 10分間

☆ チャンバ排気用ドライポンプにてN2-400sccm導入
 ☆ 上記ドライポンプの下流側で乾式剤で除害
 【適用する除害剤】
 ☆ SiN成膜排ガス用
 GBII剤(酸化銅系吸着剤)・・・SIH4処理能力: 20L/L
 ☆ クリーニング排ガス用
 GH剤(酸化鉄系)
 ・・・F2処理能力: 24L/L

- > クリーニングガス候補であったSF6、NF3共に生ガスでの乾式除害は困難
- 大陽日酸殿の実験により、NF3はプラズマ化すればポンプ下流でも分解されてNF3に戻っていない。(SF6は安定なため再度SF6に戻る。)
- > クリーニングガスは、NF3ガスに決定。(ただしArをプラズマ化してからNF3を投入)
- ▷ 除害剤は成膜時はGBII剤、クリーニング時はGH剤に決定(2系統とする)。

図 14 小型除害システムの平成 27 年度検討内容

図 15 試作した小型除害システム

# 除害性能評価

大陽日酸殿に外注依頼し、2017年6月27,28日に東北大学にFT-IR装置を持ち込み、排気 ガス成分分析による除害筒の性能評価を行った。



主な評価項目:

> シリコン窒化膜成膜時(Ar/SiH4/N2/H2プラズマ)のSiH4(シランガス)の除去効率

> クリーニング時(Ar/NF3プラズマ)のNF3の分解率、反応生成物(SiF4)の除去効率

図 16 除害性能評価実験

FT-IR測定データ例



➢ SiH4は、プラズマ着火することで約50%は分解される。
 ➢ 除害筒を通過させることで、SiH4が除去されていることを確認。

図 17 除害性能評価データ

# 除害性能評価結果

	ボッタル	除去	FT-IRで測定された濃度 (ppm)		险土动支
工程	・マイクロ波パワー	対象ガ ス	除害筒無し	除害筒 通過	陈云刘平 (%)
成膜時	Ar/SiH4/N2/H2 =2.5/5/2.5/2 sccm 25 Pa 2W	SiH4	3292	1	>99.9%
クリーニ ング時	Ar/NF3 =2.5/2.5sccm 0.67Pa 20W	SiF4	786	3	99.6%

> 除去効率99%以上の小型除害システムを実現した。

図 18 除害性能評価実験結果

## 【2】低ダメージ・高品質シリコン窒化膜 CVD 用プラズマ生成技術の開発

### 【2-1】磁場閉じ込め小型プラズマ源の開発

平成 27 年度において、3000 ガウス以上の磁界を発生させる磁石構造を見出すため、磁場 計算のシミュレーションを行った。図 19 に示すような磁石構造にすることで、効率よくプラズマを 閉じ込めるミラー磁場配位が得られることが分かった。図に示すように、ミラー磁場のピーク磁場 強度は 4000 ガウスを超えており、また、中央部も 1000 ガウス近い磁場強度を保持している。 磁場はネオジウム系永久磁石を用いて発生させる。磁場配位の検討とともに、マイクロ波を効率 良くチャンバ内へ導入する構造設計を行った。この際にはマイクロ波伝搬のシミュレーションも 行った。プラズマを励起するために電子サイクロトロン共鳴(ECR)を利用するが、その共鳴点とマ イクロ波導入窓やプラズマのサイズを規定するリミター、電位を調整するための電位調整板の設 置等、総合的に検討し、効率よく小型プラズマを励起するプラズマ源を開発した。図 20 に、図 19 に示した磁石を含めた、チャンバ構造を示す。平成 27 年度には、磁場閉じ込めの効果を実 験的に検証するために、図 21 に示すような、既存のプラズマ装置に磁場が可変となる電流コイ ルを導入し、磁場によるプラズマ閉じ込めの効果も評価し、上記設計にフィードバックしている。

平成 28 年度は、プラズマの励起特性や、プラズマサイズを評価するために、図 22 に示すように、ラングミュアプローブを製作し、プラズマ測定を行った。ラングミュアプローブは、図に示すよ

うに、径方向、軸方向の両方から挿入した。図 23 に、測定で得られたイオン飽和電流(プラズマ 密度に比例)の径方向(R 方向)及び軸方向(Z 方向)分布を示している。図に示すように、プラ ズマの大きさは、およそ直径 30mm、長さ 100mm であり、目標であるプラズマサイズ 100mm× 100mm×150mm 以下を実現した。図 24 に開発したミラー磁場プラズマ源の最終的な仕様を 示す。



▶ 最大磁場強度4340ガウス(3000ガウス以上)の磁石構造を見出した。

図 19 平成 27 年度の磁石構造検討内容



図 20 シミュレーションにより決定した磁石及びチャンバ構造



- 既存のプラズマ装置に磁場発生コイルを取り付けた。コイルであるため、磁 場強度は可変となる。
- ラングミュアプローブを用い、プラズマの磁場閉じ込め効果を検討し、ミニマル装置の設計にフィードバックさせる。

図 21 プラズマ閉じ込め効果の実験的検討



ラングミュアプローブを作製し、チャンバへ挿入。 →プラズマパラメータの軸方向(Z方向)分布及び径方向(R方向)分布を測 定した。

図 22 ラングミュアプローブ測定方法概要



径方向、軸方向ともに磁場閉じ込めの効果を確認。直径30mm、長さ100mm程度のプラズマが励起されている。

プラズマサイズ100mm×100mm×150mm以下を実現した。

図 23 ラングミュアプローブで測定したプラズマの空間分布

項目	仕様	備考
磁場発生方式	永久磁石 (Ne-Fe-B磁石)	電流コイルを用いず小型化
最大/最小磁場強度	4300/850ガウス	ミラー比(最大/最小磁場強度)=5.1
マイクロ波周波数	5.8~6.0GHz (波長50mm)	通常用いられる2.45GHz(波長122mm) に比べ短波長化
ECR磁場強度	2071~2143ガウス	強磁場強度は閉じ込め 性能が向上する方向 (2.45GHzだと875ガウス)
伝送部マイクロ波 導波管サイズ	35mm × 16mm (WRJ-7)	マイクロ波周波数を上げることで 小型導波管が使用可能 (2.45GHzだと109mm×55mm)
マイクロ波チャンバ 導入部	TE11モード円形導波 管	現状は直線偏波、円偏波も導入可能
整合方式	同軸タイプ オートチューナー	反射電力10%以下
電源定格	50W	現状、4W程度以上でプラズマ励起できる ことを確認

図 24 ミニマル化対応ミラー磁場 ECR プラズマ源の最終的な仕様

## 【2-2】高密度プラズマ生成技術の開発

開発した小型プラズマ源において、そのプラズマ性能を評価した。ラングミュアプローブを用いてイ オン電流分布、プラズマ密度、電子温度等のプラズマの基本的なパラメータを測定し、ミラー磁 場を導入することで、成膜基板へのイオン照射がどれだけ低減されるか、もしくは制御可能かを 調査した。また、プラズマ電位調整を行うことで、磁場を横切るプラズマの拡散がどれだけ低減さ れるも評価を行った。特に、プラズマ密度の評価は、プロセス性能を左右する重要なパラメータで あるため、マイクロ波パワーや圧力に対する依存性に着目して調査した。図 25 に、プラズマ密度 (電子密度)のマイクロ波パワーや圧力に対する依存性に着目して調査した。図 25 に、プラズマ密度 (電子密度)のマイクロ波パワー依存性を示す。ガスは Ar であり、圧力は 0.27Pa である。なお、 Ar プラズマは、イオンがほぼ1価の Ar イオンのみであるから、電子密度とイオン密度はほぼ等し い。マイクロ波パワー10W 程度以上で電子密度 10<sup>11</sup>cm<sup>-3</sup> 以上の高密度プラズマが励起されて いることを確認した。図 26 は、マイクロ波パワーが 40W の時の、電子密度の圧力依存性である。 広い圧力領域に亘って、密度 10<sup>11</sup>cm<sup>-3</sup> を超えるプラズマが励起されている。以上より、プラズマ 密度 10<sup>11</sup>cm<sup>-3</sup> 以上のプラズマ励起を実現するとともに、ミラー磁場閉じ込めの概念が良く機能 し、電力効率良くプラズマが励起されていることを確認した。

イオン密度(=電子密度)、電子温度のマイクロ波パワー依存性



図 25 イオン密度(=電子密度)、電子温度のマイクロ波パワー依存性



広い圧力領域(0.1~10Pa)に亘り、10<sup>11</sup>~10<sup>12</sup>cm<sup>-3</sup>のプラズマが励起された。

図 26 プラズマ密度の圧力依存性

#### 【2-3】高速・高精度圧力制御システムの開発

高速かつ高精度な薄膜形成プロセスを実現するには、チャンバ内ガス圧力(ガス組成も含む) を高速かつ高精度に制御する必要がある。このためには高速なガス置換を行うことが必須で ある。平成 28 年度、チャンバ内のガス流れを検討し、高速なガス置換を実現するガス導入 構造を見出し、チャンバ設計へ反映した。図 27 に示すように、ターボ分子ポンプ、バックポン プ等も想定されるプロセスガス流量・ガス圧力を元に選定した。また、ガス流量制御機もオー バーシュートの無い高速制御が可能なものを選定し、かつ自動圧力制御器を導入した。平成 29 年度に、導入した自動圧力制御機を用い、圧力安定化時間を評価した。図 28 に示すよ うに広い圧力領域に亘り、圧力安定化時間 10 秒以内を実現した。



図 27 高速・高精度圧力制御システムの概要図

平成28年度にミニマル装置へ導入した排気システムにおいて、自動圧力制御器(APC)を調整し、CVD成膜を行うシランガス/アルゴン/窒素/水素を導入し、圧力安定化時間を評価した。

プロセフエカ	圧力安定化 時間(秒)		
ノロビへ圧力	Ar/SiH4/N2/H2を導入し、 APCを制御させた場合	Arプラズマを制御圧力で励起中 に、SiH4/N2/H2を導入した場合	
0.67 Pa	8	8	
1.33 Pa	8	8	
2.66 Pa	7	7	
5.32 Pa	7	7	
7.98 Pa	7	7	

※ガス条件:Ar/SiH4/N2/H2=2.5/1.2/5/2.5 sccm (APC未動作時の圧力:0.33Pa)

圧力安定化時間10秒以内を実現した。

図28 高速・高精度圧力制御システムの評価結果

#### 【2-4】高品質シリコン窒化膜形成プロセスの開発

開発したプラズマ源を用いて高品質シリコン窒化膜の薄膜形成のプロセス開発を行った。活性な 窒化種がどれだけ基板へ到達したかを評価するため、当初はキセノン/アンモニアプラズマを励 起する予定であったが、キセノンは高コストであるということと、アンモニア(NH3)を用いると、窒素 と水素の比率の制御が困難になると判断し、シラン/窒素/水素ガスによりプラズマを励起するこ ととした。 平成 27 年度においては、 図 29 に示すように、 シリコン窒化膜の膜質を評価プロセスを 確立するために、東北大に所有する既存のシリコン窒化膜形成装置(減圧 CVD や大口径) ウェーハ用プラズマ CVD 装置)を用い、キャパシタを作製することで、膜質評価プロセスの構築を 行った。平成28年度には、イオン照射ダメージを低減させるとともに窒化種ラジカルを大量に基 板へ供給してシリコン窒化膜を成膜した。図 30 に示すように、アルゴン/シラン/窒素/水素プラ ズマにおいて、窒素流量により窒化特性を制御できることが分かり、最適なガス条件(窒化特性 の最適条件)を見出すことができた。平成29年度は窒化膜形成プロセス開発を更に進めた。図 31 に、その XPS(X 線光電子分光)測定によるシリコン窒化膜の深さ方向の組成分布を示す。リ ファレンスとして、標準サンプルである 750℃の減圧 CVD(LPCVD)で形成した膜も示す。本装置 において、圧力 25Pa で成膜した膜は、N/Si 比がほぼ標準サンプルと同じであることが分かっ た。さらに、LPCVDの膜では酸素が1~2%混入しているのに対し、25Paで成膜した膜は、酸素 混入量が XPS 測定での測定限界(~1%)以下であり、LPCVD の膜よりも少ないことが分かっ た。これは、非常に効率的な窒化が実現していることを強く示唆している。 図 32 には、フッ酸溶 液に対する評価結果を示す。シリコン窒化膜の屈折率はシラン/窒素流量比を制御することで、 シリコン窒化膜の理想値である2程度としている。図から分かるように、400℃の成膜温度で、 5%フッ酸溶液でのエッチングレートは 3nm/min 程度であり、750℃の LPCVD の膜と同等の値 を実現し、目標値である 4nm/min 以下を実現した。 次に、 微細化デバイスのサイドウォール形成 へ適用した場合に重要となる、パターン付き基板への側壁へのカバレッジ性能を評価した。図 33 に、ライン&スペースのパターニングを行ったシリコン基板へ SiN 膜を成膜した基板の断面 SEM 写真を示す。ライン&スペースは 0.5 µm のパターンであり1:1 の比率でパターニングさ れている。またトレンチ深さも 0.5 µm であるから、トレンチのアスペクト比は 1:1 である。このよう なパターンに、成膜温度 200℃で、60 nm の SiN 膜を成膜した。 図から分かるように、トップ部、 ボトム部、及び側壁にもほぼ同じ膜厚で成膜されており、カバレッジの良い成膜が実現しているこ とを確認した。

30







図 30 平成 28 年度プロセス評価状況

ついて調査する。また、窒素流量以外のパラメータも変化させ、更なるプロセス開発を行う。



図 31 高品質シリコン窒化膜形成プロセス開発結果



図 32 対フッ酸耐性評価結果



200℃成膜、~60nm



図 33 トレンチパターンへの成膜結果

【3】小型化

図 34、35 に、平成 27 年度に行った小型化検討状況を示す。平成 27 年度において、チャンバ、磁石、電源、ガス供給排気系、除害システム等、必要部材の検討を行いおおそよミニマル筐体へ組み込める目途を立てた。特に図 34 に示すように、マイクロ波導波路系の設計を詳細に行い、小型導波路系を実現した。

図 36、37 に平成 28 年度に行った小型化検討状況を示す。マイクロ波電源を定格 200W から 100W とすることで、電源の小型化を実現した。

図 38、39 に、平成 29 年度に行った小型化検討状況を示す。前述したように、マイクロ波 電源を定格 50W とし、さらに小型の自動整合器を搭載することができた。結果的に、プロセス 装置を構成するすべての部品をミニマル筐体へ組み込むことができた。



図 34 平成 27 年度のレイアウト検討状況



図 35 平成 27 年度のマイクロ波システムの小型化に関する検討内容



図 36 平成 28 年度のレイアウト状況

ミニマルサイズへの組み込み状況



図 37 平成 28 年度のレイアウト状況

## 装置のブラッシュアップポイント



図 38 平成 29 年度のレイアウト状況



図 39 平成 29 年度のレイアウト状況

第3章 全体総括

#### 【特筆すべき成果】

●プラズマ閉じ込めに有利となる、3000 ガウス以上の強磁場かつ 5.8GHz のマイクロ波を採用した新 規ミラー磁場 ECR プラズマ源により、非常に効率良い少ない電力での高密度プラズマ励起が実現した。 当初は 200W 程度の電力まで想定していたが、40W 程度で高密度プラズマ励起が実現した。

●ミニマル装置へのプラズマ励起電源の組み込みには小型化の取り組みが困難なために、特にマイク ロ波電源の組み込みは今までなされていなかった。本プロジェクトにおいて、電源設計時点から電源 メーカーと共同でミニマル装置での使用を想定しながら仕様検討を進めた。装置の調整時に電源のト ラブルが発生したが、電源メーカーの協力のもと、コンパクトな電源が実現した。

#### 【特筆すべき課題】

●マイクロ波励起プラズマを用いた低ダメージ薄膜形成用ミニマル装置を用いた今後の評価実験及び 成膜実験が課題である。

●本装置単体の性能を確保したのちに他のミニマルファブプロセスを含めてプロセス開発により、本事業の目的である、ゲート電極側壁に高品質なシリコン窒化膜サイドウォールのテストを行うことが課題である。

#### 【事業化の取組】

産総研からのご発注にて本装置の実用化 1 号機を製作、産総研臨海センターにミニマルファブライン ナップとして導入することが決定。今後、ミニマルファブ推進機構やファブシステム研究会にて情報収 集を行い事業戦略について検討。この臨海センターでの実験評価により、ユーザー様の仕様(条件)に マッチングすれば、直接販売の可能性がある。

37