

半導体デバイスの製造品質を裏から支える プロセスプラズマの隠れた技術

Unsung Technologies in Plasma Processing which Supports Manufacturing Quality of Semiconductor Devices

1. はじめに

1. Introduction

上 杉 文 彦 UESUGI Fumihiko 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 九州センター (原稿受付:2019年12月5日)

1.1 半導体業界の分析

はじめに世界レベルで見た半導体産業の特色について述 べる.1990年代はDRAM (Dynamic Random Access Memory)の生産で日本は世界1位であったが、その後、台湾や 韓国に変わった.DRAMの製造販売事業では、継続的な投 資を行い、微細化の追及とSiウエハの大口径化を通し て、規模の経済性を追求し、コスト・リーダーシップ戦略 をとって一気に市場を獲得する[1,2]. 微細化では2019年 は7 nm ノード、2020年では5 nm ノードといった最先端プ ロセスでの競争になる.また、使用するSiウエハは直径 300 nm が標準的である.

一方,国内のデバイスメーカはDRAMから撤退し,各デ バイスメーカは自社の強みを発揮でき,得意とするデバイ スの設計・生産に会社の経営資源を集中し,明確な少数の 市場セグメントをターゲットとする集中戦略をとり,市場 規模ではなくて収益を追求する活動をしている[1,2].例 えば,ルネサスエレクトロニクスといえば車載マイコン, 東芝はフラッシュメモリ,ソニーはCMOS イメージセン サ,三菱電機はパワーデバイスというように各社それぞれ が代表的なデバイスを生産し,特定の市場セグメントに供 給している.しかも,その市場セグメントでは世界トップ クラスの力を持っている.各社共に市場規模はDRAM ほ どには大きくないので,製品需要に合わせた生産ライン 数,ウエハロ径を使用する.300 mm ウエハを主に使用す る企業,200 mm 以下のウエハを使用する企業が混在する.

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

200 mm 以下のウエハを使用する生産ラインをレガシー ファブ (Legacy Fab) と呼んでいる.使用プロセスも 0.09 µm~0.8 µm ルールのいわゆる枯れたプロセスである.

上述した状況は、図1の国・地域別のウエハロ径別の月 間処理能力比率のグラフに良く現れている[3]. グラフ中

Installed Monthly Capacity for Each Wafer Size by



図1 国・地域別のウエハロ径別の月間処理能力比率. 縦軸は 200 mm ウエハに換算した月産ウエハ処理量の比率. 横軸 はウエハロ径 mm, 口径の下の数値は生産量で,単位は Million 枚 (100万枚). (文献[3]IC Insights 社の調査レ ポート「The 2009 Edition of the Global Wafer Capacity Analysis & Forecast from IC Insights」から引用).

author's e-mail: f-uesugi@aist.go.jp

一番右側は全ウエハを合算したときの生産能力比率を示し たものである.日本は世界有数の生産能力を持っており, 台湾や韓国と比べても遜色ない.次にウエハ口径 300 mm, 200 mm,150 mm,125 mm の生産能力を見ると,明確な差 があることがわかる.台湾,韓国は300 mm ウエハが主で あり,日本は200 mm 以下のウエハが主になっている.こ のグラフは2009年のデータで古いことを否めないが,図2 に示すように200 mm ウエハの生産ラインは衰退するどこ ろか,その必要性が高くなり,生産ラインの数,生産能力 共に増えており,今後も増えていくと予測されている[4].

日本の企業が DRAM から撤退し,最先端プロセスやそ れを実現する装置を使用しないことで,日本の半導体産業 は衰退したという話が巷間でささやかれることも多い.し かし,実態は各社の経営判断で自社の市場セグメントを変 えた結果と考えられる.それに伴って,枯れたプロセスで デバイスを効率よく生産するための新たな生産技術の必要 性が顕在化してきた.どのような技術が必要なのかをレガ シーファブを中心に以下の節で見ていくことにする.

1.2 生産ラインの共通課題

200 mm 以下のウエハを使用するレガシーファブでは, 収益性を重視するため,大きく3種類の技術が必要になる.その第1は不良発生の抑止・予知保全である.第2は メンテナンス費用の削減,第3は装置機差の低減である.

第1の不良発生の抑止・予知保全について述べる.発生 する不良はデバイスの設計やプロセスの習熟度に依存する ものではなく、生産装置に起因するもの、中でもプラズマ エッチング装置内で発生するパーティクルによる配線形状 不良である[5]. この不良は配線が完全に断線やショート している場合は、デバイスの出荷前の電気的特性テストの 工程で市場流出を防止できる.しかし,形状不良があって も、電気的特性に不具合がない場合は市場に出荷されてし まい、しばらくしてから動作不良品となり市場クレーム品 としてデバイスメーカに戻ってくる.この状況は図3の市 場クレーム品のパレート図によく現れている. あるデバイ スメーカが出荷した後、クレーム品として戻ってきたデバ イスを解析し、その原因を調べたものである、最も大きな 原因はパーティクルである. デバイスの構造や種類に応じ て第2位以下の原因は変わるため,原因A,B,Cとしてあ るが、どのデバイスの場合にも共通して不良原因の第1位 はパーティクルである. クレーム品として戻ってきたデバ イスの解析結果から分かったことは、不良原因が、プロセ ス装置内で発生したパーティクルが載っているのではなく て、パーティクルによって配線幅が部分的に細くなること による使用中の断線や隣接配線のショートであることであ る.この課題を解決するには、プラズマエッチング装置内 でパーティクルが発生する機構の解明とそれに基づく無塵 化技術が必要である.

第2のメンテナンス費用の削減では、プラズマエッチン グチャンバー内壁のプラズマによる腐蝕が課題となってい る.チャンバー内壁はプラズマ耐性を高めるために、アル ミナ (Al₂O₃) やイットリア (Y₂O₃) でコーティングされて







図3 市場クレーム品のパレート図.

いるが、半年から1年の使用で内壁全面のオーバーホー ル、場合によってはチャンバーの交換をしなければならな い.これがメンテナンス費用の大半を占めるといわれてお り、従来よりもプラズマ耐性の高い材料が必要になってい る.

第3の装置機差(号機差)の低減とは,同型機種のエッ チング装置でも使用しているうちにエッチング特性に機差 が発生し,同一条件でエッチングしているにもかかわら ず,その出来映えが変わるという現象である.この原因は プラズマエッチング装置のチャンバー内壁のAl₂O₃やY₂O₃ の腐蝕の進み方に機差が生じ,ウエハを装着する RF 電極 の面積とグランドになっている上部電極や壁の面積との比 が変わる結果,ウエハ上での自己バイアス電位が変わり エッチング特性が変化するのではないかと考えている [6].この課題の解決にも従来よりもプラズマ耐性の高い 材料が必要になる.

1.3 これまでの研究開発の流れ

市場クレーム品に直結する,プラズマエッチング装置内 壁からの剥離パーティクルに関する研究は文献[7]からは じまった.量産用プラズマエッチング装置の内壁に形成さ れた反応生成物の堆積膜からの剥離パーティクルをレー ザー光散乱法で計測している.その後,剥離パーティクル とエッチングシーケンスとの相関[8],剥離パーティクル の正帯電[9,10]を明らかにし,その知見に基づいて負電位 電極を用いたウエハへのパーティクルの付着を防止した [11].また,異常放電が発生すると,発生場所から内壁材 料が溶融飛散するパーティクルだけでなく,それ以上に, 剥離パーティクルが増大することを示した[12].パーティ クルの多量発生メカニズムやその原因となるウエハの微小 な動き,異常放電発の検出について第2,3章で紹介する.

パーティクルが発生したときにその場で計測したいとい う要望は強いが,エッチング装置のチャンバーに窓を取り 付けるなどの改造が必要になりエッチング特性の変化のお それなどの観点から困難である.そこで,装置の排気ライ ンに装着するタイプのパーティクルモニターが開発された が[13],ウエハに付着するパーティクルとの相関が十分で ないなどの理由から普及していない[14].これらに替る新 たな手法としてのプラズマインピーダンス計測システムを 開発した[15,16].パーティクル発生の予知保全に有効と 考えており,第4章で紹介する.

近年, チャンバー内壁に堆積する反応生成物を in situ クリーニングで除去する工程が取り入れられ,内壁コー ティング材料のAl₂O₃やY₂O₃がハロゲンラジカルやイオン などと反応してハロゲン化物を生成して腐蝕やダメージを 受け,パーティクルが発生することが問題になっている. この現象がチャンバー内雰囲気に在留水分があると激しく 起こる事を,他に先駆けて観測した[17].量産ラインでは メンテナンス時に水分除去で効果を上げているが,本質的 な解決には,高プラズマ耐性材料の開発が必要であり,第 5 章で紹介する.

参考文献

- [1] M. E. Porter, *Competitive Strategy* (The Free Press, 1980) Chap.2.
- [2] M.E. Porter, *Competitive Advantage* (The Free Press, 1985) Chap.1.
- [3] IC Insights, The 2009 Edition of the Global Wafer Capacity Analysis & Forecast from IC Insights (July 2009).
- [4] Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI): Global 200 mm Fab Outlook to 2021 (January 2019).
- [5] 服部 毅 編著:新版シリコンウェーハ表面のクリーン 化技術(リアライズ社,2000年),第3章第1節,第5 章第1節,第5章第4節.
- [6] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing (John Wiley & Sons, Inc. 1994) pp.368-372.
- [7] F. Uesugi et al., J. Vac. Sci. Technol. A 16, 1189 (1998).
- [8] N. Ito et al., J. Vac. Sci. Technol. B 16, 3339 (1998).
- [9] T. Moriya *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A 18, 1282 (2000).
- [10] N. Ito et al., NEC Research & Development 41, 341 (2000).
- [11] T. Moriya et al., J. Vac. Sci. Technol. A 22, 2359 (2004).
- [12] 伊藤奈津子, 上杉文彦: クリーンテクノロジー 14,7月 号,25 (2004).
- [13] K. M. Takahashi and J. E. Daugherty, J. Vac. Sci. Technol. A 14, 2983 (1996).
- [14] 上杉文彦 他: NEC 技報 50, 62 (1997).
- [15] T.Motomura et al., Rev. Sci. Instrum. 85, 026103 (2014).
- [16] Y. Kasashima et al., Appl. Phys. Express 7, 096102 (2014).
- [17] N. Ito et al., Jpn. J. Appl. Phys. 47, 3630 (2008).



小特集 半導体デバイスの製造品質を裏から支えるプロセスプラズマの隠れた技術

2. 量産用プラズマエッチング装置における フレーク状パーティクルの多量発生

2. Instantaneous Generation of Many Flaked Particles in Mass-Production Plasma Etching Equipment

笠嶋悠司,上杉文彦¹⁾

KASASHIMA Yuji and UESUGI Fumihiko¹⁾ 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 製造技術研究部門,¹⁾国立研究開発法人 産業技術総合研究所 九州センター (原稿受付:2019年12月02日)

半導体量産ラインのウエハ処理工程(前工程)で発生するパーティクルは、歩留りや装置稼働率の低下を引 き起こす主要因であり、その発生を抑制することが強く望まれている.パーティクルはウエハ処理工程の中でも プラズマエッチング工程で最も多く発生する.量産用プラズマエッチング装置では突発的に多量のパーティクル が発生する現象も知られており、及ぼす損害が大きくなるため特に深刻な問題となっている.本章ではこの突発 的多量発生現象のメカニズム解明に取り組んだ研究を紹介する.

Keywords:

plasma etching, etching reaction product, deposited film, flaked particle, electric field stress, impulsive force

2.1 はじめに

プラズマプロセスを多用する LSI (大規模集積回路)の 量産ラインでは、 プラズマエッチング工程で発生するパー ティクルの低減や抑制のための対策構築が生産効率向上に 向けた大きな課題となっている. プラズマエッチングプロ セスに起因して発生した反応生成物は、その全てが真空ポ ンプによって排気されるわけではなく排気されない分は チャンバー内壁へ付着する. ウエハ処理枚数の増加に伴っ て内壁への付着量も増加し、徐々に膜状に堆積していく. このように堆積した反応生成物起因の膜が剥離することが パーティクル発生の主要因の一つである[1-6].パーティ クルは LSI 製造の歩留りや設備総合稼働率 OEE (Overall Equipment Efficiency)を大きく低下させる最大の要因で ある. 例えば、プラズマエッチング中に発生してウエハ上 に落下、付着したパーティクルは、LSI 配線の断線や短絡 回路を生じさせ、デバイス不良すなわち不良品の直接の原 因となる.

量産ラインにおけるプラズマエッチング工程では、ウエ ハ処理枚数の増加とともにパーティクルの発生数が多くな る.先述の通り、ウエハ処理枚数の増加とともに反応生成 物のチャンバー内壁への堆積量が増加し、剥離パーティク ルの発生数が増えるためである.ウエハ1枚当たりの発生 個数は典型的には数個~数十個であることが多い.量産用 プラズマエッチング装置では、このように経時的に増加す る剥離パーティクルに加えて、多量の剥離パーティクルが 突発的に発生する現象が知られている. 突発的かつ多量の パーティクルはウエハ上で不良デバイスを多数発生させ、 歩留り低下への影響が非常に大きい.生産効率向上の観点 から特に深刻な問題となっており、突発的多量発生への対 策構築に対するニーズは大きい.ところが、その発生メカ ニズムについて詳細が未解明であるために現状としては適 切な対策がなされていない.

これまでプラズマプロセス中のパーティクルに関する研 究は精力的に取り組まれてきており、プラズマ CVD (Chemical Vapor Deposition) プロセスにおいて気相中で 発生、成長するパーティクルや、意図的にプラズマ中に混 入したパーティクルを用いてその成長や挙動を調査した研 究など多くの興味深い研究結果が報告されている[7-9な ど].しかしながら、量産ラインにおけるパーティクル対 策を構築するためには、実際の量産条件下で剥離パーティ クルの発生メカニズムを研究する必要がある[1-6]. 例え ばこれら量産条件下で実施された先行研究では、剥離パー ティクルがプロセスシーケンスと関係して発生することが 報告されている.装置構成(プラズマ生成方式や静電 チャックの種類)に依らず、エッチングプロセス中は少数 個のパーティクルが定常的に発生するが、高周波電力や静 電チャック電源のオン及びオフ時には多量のパーティクル が発生することが報告されている. また, チャンバー内壁 上に堆積した反応生成物起因の膜を剥離させるメカニズム としては,内壁におけるシース電場によって堆積膜に作用 するマクスウェルの応力であることが明らかとなっている [6].

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

corresponding author's e-mail: kasashima-yuji@aist.go.jp

ところが先述の通り,剥離パーティクルの突発的な多量 発生についてはそのメカニズムが未解明である。そこで 我々は突発的多量発生メカニズムの解明に取り組んだ。そ の結果,シース電場が非常に急峻に変化した場合にマクス ウェルの応力が撃力として堆積膜に作用し,パーティクル の突発的多量発生を引き起こすことを明らかにした[10-13].本章ではその詳細を紹介する。

2.2 実験方法

実験は図1(a),(b)に示す半導体量産用の平行平板型 リアクティブイオンエッチング(Reactive Ion Etching (RIE))[14]装置で実施した.下部電極にプラズマ生成用 の高周波電源(13.56 MHz)が接続されている.エッチング プロセス中のウエハは静電チャック(Electro Static Chuck (ESC))によって下部電極上へ吸着,固定される.静電 チャックの表面は微小な凹凸構造となっており,ウエハの 冷却を目的としてウエハ裏面にはヘリウムガスが導入され る.プロセス条件は量産ラインと同等な条件を設定可能で あり,実環境下でのパーティクル発生を再現可能となって いる.本研究ではプロセスガスはSF₆及び N₂の混合ガス, 定常圧力 18 Pa,電極間距離 60 mm, RF パワーは 600 W を用いた.

パーティクルの観測にはレーザー光散乱法を原理とした パーティクル計測システムを用いた[1,2,10].レーザー光 源は波長 532 nm の YVO4 レーザーであり、3 W、10 kHz で発振させた.レーザービームは光学系により幅約 60 mm,約 10 mm 厚のシート状に成形し、上部電極の直下 約4 mm の高さにウエハと平行方向にチャンバー内へ照射 した.プラズマエッチング中に発生したパーティクルが レーザーシート光を横切った場合、散乱光が生ずる.散乱 光はレーザーシート光と90°の角度をなす方向に設置した



図1 実験装置概略図 (参考文献[10]の図1を引用). Copyright (2013) The Japan Society of Applied Physics.

CCD カメラによって画像として検出される.本実験では レーザー500パルス分を積算して一枚の画像として保存す ることで,0.5 秒間の現象を一枚の画像として記録した.各 画像間の取得間隔は約0.6秒である.本システムはRIE装置 のステータスシグナル(高周波電力(RF power)やガス圧 など)も同時に取り込み可能なシステムとして構築されて おり,取得画像と装置の稼働状態との時間的な対応関係を 把握可能である.

パーティクル発生とシース電場の変化との関係を調べる ため、チャンバー内壁の電位をモニタリングする手法とし て Viewing Port Style Plasma Probe (VP-Probe) [15, 16] を 用いた. VP-Probe はプロセスチャンバーに取り付けられ たビューイングポートをプローブとして利用する手法であ る. ビューイングポートの大気側に電極を設置すること で、その真空側すなわちチャンバー内壁側の浮遊電位(内 壁電位)の過渡的な変化発生をモニタリングすることが出 来る.例えば、異常放電などによってプラズマ中のポテン シャルが揺らいだ場合の内壁電位の変化発生を検出するこ とが可能である.エッチング反応生成物に起因した堆積膜 も絶縁体であることから、堆積膜における浮遊電位の変化 についても VP-Probeで検出が可能となる. さらには、堆積 膜へ作用するマクスウェルの応力はシース電場の二乗で作 用するため[17],当該応力の変化発生についても把握する ことができる.

量産ラインのプラズマエッチングプロセスにおいて内壁 電位の急峻な変化を引き起こし得る代表的な要因として, ウエハの浮動(ウエハ吸着不良)や異常放電が挙げられる. これらの異常をin-situ(その場)検出する手法として, 我々はアコースティックエミッション(Acoustic Emission (AE))センサ内蔵ウエハステージを開発した[本小特集第 3章参照, 18-21].本手法は従来手法では検出が極めて困 難であったウエハ近傍での異常放電を初めて検出可能とし た技術であるが,本研究ではウエハの浮動を検出するため に応用した.ウエハ浮動が発生する主な要因は,静電 チャックによるウエハの静電吸着力と裏面冷却用のヘリウ ムガス圧力との不均衡である.なお本研究の一部ではウエ ハ浮動が発生しやすい吸着条件にあえて設定して実施し た.

VP-Probe, AE センサの各シグナルは高周波電力及び CCD カメラのステータスシグナルとともにオシロスコー プを用いて測定した.すなわちこれらの時間的な対応関係 が把握可能である.サンプリング周波数は1 MHzに設定し た.

2.3 実験結果

パーティクルはウエハを数百枚程度エッチング処理した 後に顕著に発生するようになり、その後はウエハ処理枚数 とともに発生数が増加する傾向を示した.チャンバー壁へ の反応生成物の堆積を発生源とする量産ラインでのパー ティクル発生傾向と一致している.内壁表面への堆積膜を 観察した結果、反応生成物起因の組成であることを実際に 確認できていることからも本実験で検出したパーティクル は剥離パーティクルであると考えて良い.図2はウエハ 25枚当たりのパーティクル発生数とエッチング装置のス テータスシグナルとの関係を示す実験結果である. エッチ ングプロセス時の装置の動作は下記の通りである. ウエハ がプロセスチャンバー内へ自動搬送された後,まず ESC 電源が投入され、続いてプロセスガスが導入される、チャ ンバー内圧力が設定値に達し安定した後、高周波電力が投 入されプラズマエッチング処理が施される. エッチング終 了後はパージ用窒素ガスがチャンバー内に導入された後. ウエハが取り出される. なお、ウエハ冷却用のヘリウムガ スは約44.3秒の時点よりウエハ裏面に導入されている. 37.0 秒時点でのピークは、ヘリウムガス用のバルブ開動作 に伴い観測される配管内残留ガスに起因した流量増加であ る.44.3 秒のピークは、裏面ガス圧力が設定値に達するま でヘリウムが導入されるための流量増加であり、これ以降 エッチング終了時までウエハは冷却される.

図2からパーティクル発生とエッチング装置の動作状況 との関係が読み取れる.エッチング処理前後に観測されて いる少数のパーティクルは、ウエハ搬送時のバルブ開閉に 伴うチャンバー圧力の変動、または堆積膜への熱応力の作 用によって発生したと考えられる. エッチング処理中は少 数のパーティクルが定常的に発生している。一方、エッチ ング処理終了の瞬間には多量のパーティクルが発生してい ることがわかる. 先述の通りこれまでに明らかにされてき た剥離パーティクルの発生メカニズムは、エッチング中定 常的に堆積膜へ作用するマクスウェルの応力である. すな わち、堆積膜における内壁電位とチャンバーの接地電位と の電位差による電場の二乗に比例したマクスウェルの応力 が堆積膜へ作用することで堆積膜が剥離する[6, 10-13]. ところが, 図2で示されているように, エッチング処理中, つまりプラズマ生成中は少数のパーティクルが定常的に発 生しているのに対し、エッチング終了時には多量のパー ティクルが突発的に発生している.同様の現象は参考文献 [1-5]でも報告されており、参考文献[6] では高周波電力 投入時や ESC 電源のオンオフ時にも多量発生が観測され ている.したがって、我々の実験結果及び先行研究で示さ れているこれらの結果は、マクスウェルの応力が瞬間的に 大きくなり得るメカニズムの存在を示唆している.なぜな ら、単にマクスウェルの応力が定常的に働くことのみが パーティクルの発生要因あれば、安定にプラズマが生成さ れている間も高周波電力オフ時もパーティクルの発生数に 差異は現れないはずである.しかしながら、実験結果は高 周波電力オフ時の多量発生を示している.

仮に高周波電力オフ時に応力が瞬間的に増大したとすれ ば、堆積膜が瞬時に大きく変形し、容易に剥離して多量の パーティクルとなり得る.このメカニズムを説明可能な現 象として、古典力学や衝撃工学の分野で知られている撃力 がある[22,23].撃力は、ある力が物体へ働く際、その作用 時間が短いほど瞬間的に極めて大きな力となって作用する という現象である.つまり、マクスウェルの応力が高周波 電力オフ時に撃力として働くとすると、堆積膜が瞬間的に 急激に変形することで多量パーティクルの発生源となり得 る.マクスウェルの応力は内壁でのシース電場に依存する ので、応力の増大は高周波電力オフ時のシース電場の変化 から生ずるはずである.そこで撃力作用のメカニズムを検 証するために、VP-Probeの測定を実施した.

図3は高周波電力オフ時のVP-Probeの測定結果である. 急峻に変化する波形が観測されている.VP-Probeの出力 はビューポート内壁へのイオンのフラックスと電子のフ ラックスの過渡的な不平衡から生ずる[15].高周波電力オ フ時には、バルクプラズマ中に存在した電子が拡散速度の 違いからイオンよりも先に内壁側へ拡散するため、プロー ブ波形は急峻に負に変化すると考えられる.本結果は、高 周波電力オフ時に堆積膜における電場が急峻に変化するこ と、つまりマクスウェルの応力が撃力として働くメカニズ ムの存在を示唆している.ところが、図3のような VP-



図 2 ウエハ25枚当たりのパーティクル検出数とエッチング装置 のステータスシグナルとの関係(参考文献[10]の図 3 を引 用). Copyright (2013) The Japan Society of Applied Physics.

図3 高周波電力オフ時の VP-Probe の測定結果(参考文献[10] の図5を引用). Copyright (2013) The Japan Society of Applied Physics.

Probe 波形は変化時間の幅に若干の差は見られるものの, 高周波電力オフ時にはパーティクル多量発生の有無に依ら ず常に観測された.そこで我々は,撃力化メカニズムの存 在を明確にするために,エッチング中にシース電場が急峻 に変化した場合のパーティクル検出を試みた.

図4(a)はある一枚のウエハをエッチング処理している 最中に,ウエハの吸着不良によってウエハが浮動した場合 の測定結果である.53.3秒においてヘリウム流量が突然上 昇しているが,これはウエハの浮動に伴ってヘリウムガス がウエハ裏面からリークしたことを示している.そしてそ のタイミングにおいて,多量のパーティクル発生が検出さ れている.ウエハの浮動は裏面のヘリウムガス圧力と静電 吸着力の不均衡から生じたウエハステージ(下部電極)上 での現象である.したがって,ウエハ浮動に伴ってウエハ ステージ内で機械的な振動すなわち弾性波が生ずるとすれ ば、ウエハステージ内蔵のAEセンサによってその発生を 検知し得る.図4(b)はそのような目的のもと測定したAE センサの波形である.53.3秒におけるヘリウムガスの増加 と同じタイミングにおいて突発的な大振幅のシグナルが観

図 4 ウエハ吸着不良発生時の(a)パーティクル検出数とエッチ ング装置のステータスシグナルとの関係、(b)ウエハス テージ内蔵 AE センサの測定結果、(c)VP-Probeの測定結 果(参考文献[10]の図7を引用). Copyright (2013) The Japan Society of Applied Physics.

測されている.このシグナルはウエハステージ上で発生し た弾性波が AE センサで検出されたことを示す. なおウエ ハステージ上で発生した弾性波はチャンバー壁まで伝搬出 来ないため [本小特集第3章参照],図4(a)で観測された パーティクルの発生要因としてウエハ浮動に伴うチャン バー壁の機械的振動の可能性は否定される.図4(c)は VP-Probeの測定結果である.パーティクルの多量発生が 観測された時刻と同じタイミングで突発的な正方向の変化 が検出されており、その後約4秒間に渡ってシグナルの変 動がみられる.この結果は、ウエハ浮動に伴い内壁近傍の 電場が急峻に揺らいだことを示す。エッチング処理中のウ エハはセルフバイアス電位であるので、ウエハが物理的に 浮動することで内壁電位の揺らぎが引き起こされたと考え られる. 53.3 秒におけるシグナルの拡大図を図5に示す. 内壁電位の急峻で大きな変化の発生が検出されている。正 方向のシグナル変化は、ウエハ浮動によってウエハ裏面で 異常放電が発生したことによると考えられる[本小特集第 3章参照].

ここで重要な点は、パーティクルの突発的多量発生と内 壁電位の急峻な変化が同時に観測されたことである.この 内壁電位の変化は、堆積膜へ働くマクスウェルの応力を瞬 間的かつ大きく変化させ得ることを意味する.つまり、マ クスウェルの応力が撃力として作用し、パーティクルの突 発的多量発生をもたらすことを示す.図6は図4(a)の 53.3秒において取得された CCD カメラの取得画像である. 多量のパーティクルが上部電極から剥がれ落ちている様子 が検出されている.なお本画像には入射レーザー光による チャンバー内でのわずかな迷光によって、ウエハの浮動も 捉えられていた.これは前述の AE センサによるウエハ浮 動検出を裏付けている.すなわち、図6はウエハ浮動とい うウエハステージ上での現象と、剥離パーティクルの発生 という上部電極での現象がチャンバー内の異なる箇所で同 時に発生したことを示している.

図5 図4 (c)53.3 秒における VP-Probe の拡大波形(参考文献 [10]の図8を引用). Copyright (2013) The Japan Society of Applied Physics.

図 6 図 4 (a)の 53.3 秒における CCD カメラの取得画像 (参考文献[10]の図 9 を引用). Copyright (2013) The Japan Society of Applied Physics.

マクスウェルの応力の撃力作用について考察する[11]. 図5の測定結果を基に、ある時間t₀で急峻に変化しその後 減衰していく応力が膜の変形に及ぼす影響について考え る. 堆積膜の変形はこの応力を外力とした強制振動でモデ ル化することができる.この強制振動は解析的に解くこと が可能であり,解析結果を基にto(電場応力が変化する時 間)と堆積膜の最大変位との関係をプロットした結果を 図7に示す.toが小さいほど膜の変形量xが大きくなる傾 向にあること、特に to が極めて小さい場合に変形量が急激 に大きくなることが示されている.この結果は、電場の応 力の変化が急峻なほど、堆積膜が大きく変形することを意 味する. 言い換えれば, 急峻に変化する内壁電位によって 応力が撃力として作用し得ることを示している. 古典力学 や衝撃工学といった異分野で用いられる解析手法を導入す ることにより、電場の応力の撃力作用によって堆積膜が急 激に変形して容易に剥離し、パーティクルの多量発生が引 き起こされるというメカニズムが解明された.

以上の結果より,チャンバー内壁における電場の急峻な 変化がパーティクルの突発的多量発生と関係していること が示された.内壁近傍のシース電場により堆積膜へ働くマ クスウェルの応力が急峻に変化すると,撃力として作用す

図7 強制振動モデルを用いて解析した電場の応力が変化する時 間と堆積膜の最大変位との関係(参考文献[11]の図12を引 用). Copyright (2015) The Japan Society of Applied Physics.

る.その結果,堆積膜が瞬間的に大きく変形して剥離し, 多量のパーティクルが発生する.本研究では上部電極から のパーティクルのみを観測したが,側壁などその他のチャ ンバー壁上の堆積膜からも同様にパーティクルが発生して いるはずである.量産ラインでは,これらの剥離パーティ クルが深刻な製造効率の低下をもたらしていると考えられ る.

2.4 まとめ

量産ラインで製造効率低下の主要因となっているパー ティクルについて,突発的多量発生のメカニズム解明を目 的とした研究を実施した.チャンバー内壁の堆積膜に作用 するマクスウェルの応力が内壁電位の急峻な揺らぎによっ て瞬間的に変化し,撃力として作用することで,多量の パーティクルが突発的に発生することが明らかとなった.

参 考 文 献

- [1] F. Uesugi et al., J. Vac. Sci. Technol. A 16, 1189 (1998).
- [2] N. Ito et al., J. Vac. Sci. Technol. B 16, 3339 (1998).
- [3] T. Moriya et al., J. Vac. Sci. Technol. A 18, 1282 (2000).
- [4] T. Moriya et al., J. Vac. Sci. Technol. B 22, 2359 (2004).
- [5] N. Ito et al., Jpn. J. Appl. Phys. 47, 3630 (2008).
- [6] T. Moriya *et al.*, IEEE Trans. Semicond. Manuf. 18, 477 (2005).
- [7] H. Setyawan et al., J. Appl. Phys. 97, 043306 (2005).
- [8] G.S. Selwyn et al., Appl. Phys. Lett. 57, 1876 (1990).
- [9] T. Fukuzawa et al., J. Appl. Phys. 80, 3202 (1996).
- [10] Y. Kasashima et al., Jpn. J. Appl. Phys. 52, 066201 (2013).
- [11] Y. Kasashima et al., Jpn. J. Appl. Phys. 54, 01AE02 (2015).
- [12] Y. Kasashima and F. Uesugi, J. Vac. Soc. Jpn. 59, 360 (2016).
- [13] Y. Kasashima and F. Uesugi, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 110308 (2014).
- [14] M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing 2nd ed.* (Wiley -Interscience, New Jersey, 2005) Chap. 15, p. 571.
- [15] M. Yasaka et al., Jpn. J. Appl. Phys. 42, L157 (2003).
- [16] M. Yasaka *et al.*, Proc. Int. Symp. Semiconductor Manufacturing, p.333, Tokyo (2004).
- [17] J.A. Stratton, *Electromagnetic Theory* (McGraw-Hill, New York, 1941) Chap. 2, p. 83.
- [18] Y. Kasashima et al., The Encyclopedia of Plasma Technology II. (CRC Press, Taylor & Francis, New York, 2017) p. 1517.
- [19] Y. Kasashima et al., J. Vac. Soc. Jpn. 57, 24 (2014).
- [20] Y. Kasashima *et al.*, IEEE Trans. Semicond. Manuf. 52, 350 (2013).
- [21] Y. Kasashima et al., Jpn. J. Appl. Phys. 53, 03 DC04 (2014).
- [22] L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Mechanics* 3rd ed. (Elsevier, Oxford, U.K., 1941) Chap. 5, p. 58.
- [23] H. Goldstein *et al.*, *Classical Mechanics 3rd ed.* (Addison-Wesley, Reading, MA, 2001) Chap. 2, p. 34.

3. プロセスプラズマにおいて発生する異常放電と AE センサを用いた検出方法

3. Development of Detection Method for Micro-Arc Discharge in Plasma Process by using Acoustic Emission Sensor

笠嶋悠司,田原竜夫,上杉文彦¹⁾

KASASHIMA Yuji, TABARU Tatsuo and UESUGI Fumihiko¹⁾ 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 製造技術研究部門,¹⁾国立研究開発法人 産業技術総合研究所 九州センター

(原稿受付:2019年12月02日)

半導体量産ラインにおけるプラズマプロセスで発生する典型的な異常として異常放電が挙げられる.異常放 電はパーティクルとともに量産ラインにおいて歩留りや装置稼働率を低下させる要因であり,その対策が強く望 まれている.ウエハ近傍で発生する異常放電はウエハの損傷に直結するため,特に問題となる.その抑止に向け てはまずプロセス中にその場で異常放電発生を検知する手法の開発が必要である.本章では,ウエハ近傍で発生 する異常放電の検出手法として開発した薄型アコースティックエミッションセンサ内蔵型ウエハステージについ て紹介する.

Keywords:

micro-arc discharge, acoustic emission sensor, in-situ detection, aluminum nitride piezoelectric film, wafer stage

3.1 はじめに

LSI (大規模集積回路) の製造ラインにおいて最も深刻 な問題の一つが異常放電である[1,2]. 異常放電はプラズ マプロセス中に突発的かつ局所的に発生し, プロセスチャ ンバー内の各種部品や電極, スパッタターゲットなどに損 傷を与えるとともにプロセスの変動要因にもなる[2,3]. 製造歩留りの低下に加え, 異常放電の規模や頻度によって は装置を停止し発生箇所の調査やチャンバー内のメンテナ ンスが必要となるため, 装置稼働率を大きく低下させる.

異常放電はプロセスチャンバー内の様々な箇所で発生し 得るが、その中でも特に問題となるのはウエハ(被処理製 品)の近傍で発生する異常放電である.ウエハ近傍での異 常放電はウエハ自体の焼損やウエハ上のデバイス破壊の直 接の原因となる. また、ウエハ上のデバイス構造に起因し て発生する異常放電も存在するが、加工寸法の微細化に 伴って異常放電の規模も小さくなるとその発生を検知する ことはより一層困難となる.異常放電の発生がプロセス中 に検知されない場合、損傷したウエハが以降の工程に進 み,前工程最終段の検査工程にて初めてその損傷が発覚す る場合も多い.検査工程まで進んだウエハは製品としての 付加価値が既に高くなっているため、その段階で異常放電 による損傷が発覚してウエハ廃棄に至れば損害となる. 異 常放電は一度発生するとその後の発生頻度が高くなること が経験的に知られており、結果として多数のウエハを廃棄 せざるを得なくなり、製造コストの上昇を引き起こす. 更 に、前工程におけるどのプロセスで異常放電が発生したの かを特定する必要が生じ、その調査や復旧作業に要する時 間は装置稼働率の低下、ひいては製造コストの増加を招 く.このように量産ラインにおいて異常放電は大きな問題 であり、その抑止対策を構築する上でも、異常放電をプロ セス中にその場で検出可能な手法の開発が強く望まれてい る.

異常放電の検出手法としては、これまでもいくつか提案 されている[4-12].しかしながら量産装置への適用が難し いのが現状である。例えば異常放電に伴って発生する発光 や電磁波を検出する手法ではプロセスチャンバーに取り付 けられたビューイングポートを観測に利用するが、量産装 置にはモニタリング用途のポートは通常設けられていな い.更に従来手法では異常放電の発生箇所を特定できない ことも現場のニーズから見た課題として挙げられる.

アコースティックエミッション(Acoustic Emission (AE))法は異常放電に伴って発生する弾性波を検出する 手法である[13-20].チャンバー外壁上に取り付けた AE センサによって、チャンバー内壁近傍で発生した異常放電 を検出することができる.更には複数個の AE センサを同 時にモニタリングすることで異常放電の発生箇所を特定す ることも可能であり、既存の検出手法の中では最も量産ラ インへの適用に適した手法である.しかしながらこの AE 手法を用いてもウエハ近傍で発生した異常放電の検出は困 難である.

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

corresponding author's e-mail: kasashima-yuji@aist.go.jp

プラズマプロセスチャンバー内でウエハを搭載するウエ ハステージには高周波電力を印加するための電極が組み込 まれている.そのため接地電位にあるチャンバー壁との間 には,絶縁用の樹脂製部品やOリング等の部品が多数設置 されている.これら樹脂製部品と金属製部品(一般的には アルミニウム)で構成されるウエハステージとの音響イン ピーダンスは一桁以上異なる[21,22].したがって,ウエ ハ近傍で発生した異常放電に伴い発生する弾性波は,ウエ ハステージを介してチャンバー壁まで伝搬する間にこれら 樹脂製部品との境界面で大きく減衰する.すなわち,チャ ンバー外壁までは伝搬できないため,外壁上に設置した AE センサではその検出が原理的に困難となる.

そこで我々は,独自に開発した薄型 AE センサをウエハ ステージに内蔵するという検出手法を考案,開発した[21-24].本章では本手法の特長や従来手法に対する優位性な どについて紹介する.

3.2 実験方法

実験は図1に示す半導体量産用の平行平板型リアクティ ブイオンエッチング (Reactive Ion Etching (RIE))装置で 実施した.ウエハステージ内の下部電極にはプラズマ生成 用の高周波電源 (13.56 MHz) が接続されている.ウエハス テージ最上部には単極型静電チャック (Electrostatic chuck (ESC))が取り付けられており,プロセス中のウエ ハを吸着,固定する機能を持つ.プロセス条件は量産ライ ンと同等な条件を設定可能である.本研究ではプロセスガ スはSF₆及び N₂の混合ガス,定常圧力 18 Pa,電極間距離 60 mm,高周波パワーは 600 W に設定している.実験の一 部では Ar ガスを用いているが,ガス種以外の条件は同一 である.

AE センサをウエハステージに内蔵させることを考えた 場合,既存の従来型センサを使用することは困難である. その理由は従来型センサのサイズであり,典型的には直径 20 mm,長さ 20 mm 程度のサイズを有する.また耐熱温度 も上限が80℃程度であり,プロセスチャンバー内で使用す るには耐熱性が不足している.そこで我々は,ウエハス テージに内蔵が可能でかつ耐熱性にも優れた薄型の AE セ ンサを独自に開発した[25].後述の通り,薄型センサは約

図1 実験装置概略図(参考文献[22]の図1を引用).

3µm 厚の窒化アルミニウム (AIN)の薄膜圧電体を用いて いる.AINは圧電性セラミックスの中で最も高い耐熱性 (1200℃)を有するため[26-29],センサとしての耐熱性も 従来型に比べて優れる.なお本研究で使用したセンサの実 際の耐熱性はセンサ構成部材やケーブルの耐熱性によって 制限されるものの約250℃まで使用可能である.

薄型 AE センサの概要図を図2に示す.本センサは2つ の AIN 薄膜, 両薄膜間のダンパーから構成される. 片側の 薄膜は弾性波検出用(検出面)として機能し、他方の薄膜 は高周波ノイズを除去するための参照用(参照面)として 機能する.AE シグナルの測定時には、両薄膜からの出力 信号に対して差動シグナルを測定する. プロセスチャン バー内では AE シグナルの測定を阻害する高周波電源起因 の 13.56 MHz の高周波ノイズが存在するが, 差動シグナル を測定することによって当該ノイズを除去することが可能 となる.異常放電によって発生した弾性波はウエハ側に向 け設置した検出面で検出される一方、ダンパーによって減 衰を受けるため他方の参照面では検出されない. このよう なセンサ構造にすることで、高周波ノイズが多いプラズマ プロセス環境下でも異常放電を効果的に検出することが出 来る.本章で使用した AE センサのサイズは 1.5 cm², 厚さ は約1mm である.

図1に示す通り, ウエハステージを改造しESC 直下に薄型 AE センサを内蔵させた. なおこの改造前後でプラズマ エッチング特性, すなわちウエハ面内のエッチング均一性 及びエッチングレートが変わらないことを確認している. 実験では比較用のセンサとして図1で示すようにウエハス テージシールドにも薄型センサを設置し, 更にチャンバー 外壁には従来型センサを取り付けた. 以降特に断らない限 り, これらのセンサを内蔵センサ, シールドセンサ, 外壁 センサと称することとする. AE シグナル測定時のサンプ リング周波数は 20 MHz または 1 MHz であり, 薄型センサ 及び従来型センサに用いたアンプの増幅度は各々1,000及 び30である.

異常放電発生を検知するための参照用プローブとして Viewing port style plasma probe(VP-Probe)を用いた [13,17]. VP-Probe 法はチャンバーのビューポートをプ ローブとして利用する手法であり,ビューポートの大気側 に電極を取り付けることで,その真空側における内壁電位 の過渡的な変化発生を間接的に検出することができる. 観 測用のビューポートが設けられていないことが多い量産装

図2 薄型 AE センサ概略図(参考文献[22]の図2を引用).

置では用いることができないものの,異常放電に伴うプラ ズマ中の電位変動を簡便にモニタリングすることが可能な 手法である. VP-Probeのサンプリング周波数はAEセンサ 同様に 20 MHz または 1 MHz に設定した.

3.3 実験結果

量産ラインでは,先述の高周波ノイズの他にも AE シグ ナルの測定を阻害する多くのノイズ源が存在する.プロセ スチャンバーへのウエハ搬送動作は機械的ノイズの代表例 である. 量産用装置はスループットを上げるために通常マ ルチチャンバー構成となっており、例えばあるチャンバー においてプロセスを実行中に隣接のチャンバーではウエハ の搬送がなされる.この場合、隣接チャンバーのバルブ開 閉動作がAEシグナル測定にとってのノイズ源となる. 図3(a),(b)はこのようなノイズ源に対して AE シグナル を測定し、内蔵センサの優位性を検証した結果である. 各 波形はそれぞれ、隣接チャンバーにおいてウエハ搬送に伴 いバルブが開動作した際の内蔵センサ及び外壁センサの測 定結果である.図3(a)の内蔵センサのAE波形は変化が無 いのに対し,図3(b)の外壁センサの波形は大きなAEシグ ナルを検出している. すなわち, 外壁上に設置されたセン サは隣接チャンバーからのシグナルに敏感に反応してい る.一方で、内蔵センサはそのようなノイズシグナルを検 出せず応答していないことが示されている.本結果から チャンバー外壁とウエハステージの間を弾性波が伝搬でき ないことがわかるが、これはウエハ近傍での異常放電を検 出するためにはウエハステージにセンサを設置する必要が あることを示している. そこで次の検証として、ウエハス テージにおけるセンサ設置個所について検討した.図4 (a), (b) はそれぞれ, ウエハステージの上部を機械的に打

図3 隣接チャンバーにおいてウエハ搬送時にバルブが開動作した際の(a)内蔵センサ、(b)外壁センサの応答シグナル(参考文献[22]の図3を引用).

撃した際の内蔵センサ及びシールドセンサの AE シグナル 測定結果である.図4(a)の内蔵センサの波形は打撃に応 答しているのに対して、図4(b)のシールドセンサの波形 には変化が見られない.本結果はウエハステージ上,すな わちウエハ近傍で発生した弾性波を検出するためにはその 発生源の直近にセンサを設置する必要があることを示して いる.以上,ノイズ源への応答及び AE センサの設置個所 について検証した図3及び図4の結果より、ウエハ近傍で の異常放電を検出するために最適なセンサ設置個所は、ウ エハステージ内の ESC 直下であることが明らかとなった.

前章で述べた通り、プロセスチャンバー内では絶縁用の 樹脂製部品、構成部品間のOリングなどの部材が多数使用 されている.実際にESCとウエハステージシールドの間に もポリテトラフルオロエチレン (polytetrafluoroethylene (PTFE))製部品やOリングが取り付けられている.**表1**に これらの部品を含むウエハステージの構成部品に関する部 材材料とその音響インピーダンス、Oリングとの境界面に おける弾性波の透過率を示す.音響インピーダンス Z は式 (1)の通り、各材料の密度 ρ 及び材料内での弾性波の速度 C で決まる[30].なお弾性波の縦波は横波に対して十分 に大きな伝搬速度を有するためここでは縦波のみを考慮し ている.また、音響インピーダンス Z₁ と Z₂ の境界面にお ける弾性波の透過率T は式(2)の通り求めることができ る.

$$Z = \rho \cdot C \tag{1}$$

$$T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \tag{2}$$

表1からわかる通り、ESCの部材であるアルミナ

図 4 ウエハステージの上部を打撃した際の(a)内蔵センサ,(b) シールドセンサの応答シグナル(参考文献[22]の図 4 を引 用).

構成部品	材料	音響インピーダンス Z(×10 ⁶ kg/m ² /s)	O リングとの境界面における弾性波の透過率 T (%)	
チャンバー,ウエハステージ, ウエハステージシールド	Al	17.3	33.6	
静電チャック (ESC)	Al ₂ O ₃	41.8	15.5	
樹脂製絶縁体	PTFE	2.35	97.9	
O リング	ゴム	1.76	-	

表1 ウエハステージの構成部品に関する部材材料、音響インピーダンス、O リングとの境界面における弾性波の透過率.

(Al₂O₃)とOリングとの境界における弾性波の透過率は 15.5% である. アルミナの表面や内部で発生した弾性波が Oリングを透過する際には境界面を2回透過することを考 慮すると、透過波の振幅は入射波の3%以下まで低下す る. また、ウエハステージ (アルミ製) が4個のアルミパー ツ,かつそれらのパーツ間に1個ずつ計3個の0リングが 設置されている場合、弾性波の振幅は最終的に入射波のわ ずか0.14%となる.実際のウエハステージではESCとウエ ハステージシールドの間には3個以上のOリングが用いら れている.したがって,発生源での振幅値が図4(a)のよう に5V(ピークピーク値)の場合,Oリング3個分の境界面 を透過した弾性波の振幅値は7mVまで減少することとな る. 図4(b)の測定結果ではAEシグナルが観測されていな いが、その理由は上記考察してきたとおり、ウエハステー ジ上面で発生した弾性波がウエハステージシールドに伝搬 するまでの間に大きな減衰を受けるためである. ウエハス テージ上面で発生した弾性波を検出するための AE センサ 設置個所としてシールド部は適しておらず、ステージ上で 発生した弾性波はセンサをステージに内蔵することで初め て検出可能となることがわかる.

以上の通り, 薄型 AE センサ内蔵ウエハステージ手法は 高周波電源からの高周波ノイズのみならず, 外壁からの機 械的ノイズといった外来ノイズ源からの影響を受けず, ウ エハステージ上で発生した弾性波のみを検出する. 従来手 法に対して大きな優位性を持つことが明確となった.

続いて、内蔵センサを用いてウエハ近傍で発生した異常 放電を検出した結果について述べる. 図5(a), (b)はそれ ぞれ内蔵センサ及び VP-Probe の測定波形である. サンプ リング周波数は20 MHzである. 図5 (a)では内蔵センサが 振幅の大きな AE シグナルを断続的に検出しており、ウエ ハステージ上で弾性波が断続的に発生したことがわかる. 他方図5(b)では、内壁電位の急峻な変化の発生がVP-Probe によって検出されている. ここで, VP-Probe のシグ ナル変化はビューポートへ向かう荷電粒子のフラックスの 不均衡により生ずる[13]. 図5(b)で検出された正方向の 変化は、ウエハ裏面とウエハステージ表面間における異常 放電の発生に起因すると考えられる. プロセス中のウエハ の電位は負のセルフバイアス電位であるが[31],同時にウ エハステージには ESC 用に正の直流高電圧が印加されて いる.したがってウエハ裏面で異常放電が発生するとウエ ハの電位は正方向に変化し得る. その結果バルクプラズマ 中からウエハ方向への電子フラックスが瞬間的に増大(バ ルクプラズマ中の電子が瞬間的に減少)し、ビューポート へ向かう電子のフラックスが減少したと考えると、プラズ

図5 異常放電発生時の(a)内蔵センサ、(b)VP-Probeの検出結 果.(c)(a)の波形に対する時間周波数解析結果(参考文献 [22]の図5を引用).

マ電位及び内壁電位が正方向に変化し得る.図5(c)は図 5(a)の内蔵センサの波形に対する時間周波数解析結果で ある.1 MHz 以上の周波数帯域に及ぶ急峻な変化が特徴的 である.ここで重要な点は、これらの急峻な変化が図5 (b)における VP-Probeの変化のタイミング(異常放電を検 出したタイミング)と明らかに一致していることである. すなわちこれらの結果は、内蔵センサがウエハ裏面で発生 した異常放電の検出に成功したことを示している.そして 異常放電検出時のAEシグナルにはMHz帯域に特徴的な成 分を持つことも明らかとなった.

ウエハ近傍で発生した異常放電の検出について内蔵セン サの優位性をより明確に実証するために実施した実験結果 を図6(a)-6(c)に示す.本実験はArプラズマで実施して おり,それぞれ1MHzのサンプリング周波数で測定された 図6(a)内蔵センサ、図6(b)外壁センサ、図6(c)VP-Probeの波形である.内蔵センサとVP-Probeは100ms の間に3回の突発的シグナルを観測している一方で、外壁 センサは無反応であることがわかる.内蔵センサとVP-Probeは同じタイミングで突発的シグナルを検出してお り、またVP-Probeは図5(b)で観測された変化と同様に正 方向の変化を示していることから、本プロセス中でもウエ ハ裏面で異常放電が発生し、内蔵センサがそれに伴って発 生した弾性波を検出したことが示されている.図7は図6

図 6 異常放電発生時の(a)内蔵センサ、(b)外壁センサ、(c) VP-Probeの検出結果(参考文献[22]の図 6 を引用).

図7 図6(a)で観測された突発的AEシグナルのうちの一波形に 対する時間周波数解析結果(参考文献[22]の図7を引用).

(a)で観測された突発的 AE シグナルのうちの一つについ て時間周波数解析した結果である. 横軸約 2.4 ms において 500 kHz 以上の周波数成分が観測されているが, このタイ ミングは図6(c)で観測された VP-Probeの突発的シグナル 発生に対応していることから, 内蔵センサによる異常放電 検出を裏付ける結果である.

以上の結果より, 薄型 AE センサ内蔵ウエハステージ手 法がウエハ近傍で発生した異常放電に対して外壁センサ, すなわち従来 AE 法に対して明確な優位性を有することが 実証された.

3.4 まとめ

ウエハ近傍で発生する異常放電の検出手法として,AE センサを用いた新たな手法を開発した.AIN 薄膜圧電体を 用いた薄型 AE センサを独自開発し,当該センサを量産用 プラズマエッチング装置のウエハステージへ内蔵させる手 法を考案した.ウエハ近傍で発生した異常放電の検出及び 従来 AE 手法に対する明確な優位性を実験的に実証し,薄 型 AE センサ内蔵ウエハステージ手法の有効性を明らかに した.

謝 辞

本研究の一部は株式会社クリエイティブテクノロジーと の共同研究により実施されました.本研究の実施にあたり ご支援いただきました八坂三夫氏(元崇城大学教授),本 村大成氏,秋山守人氏(国立研究開発法人 産業技術総合 研究所)に筆者一同お礼申し上げます.

参考文献

- [1] R.A. Scholl, *Proc. 36th Annual Technical Conf.*, Soc. Vac. Coaters. p.405, Texas (1993).
- [2] D. Shanks, Proc. IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conf. p. 293, Cambridge (1996).
- [3] M. Yamashita et al., Jpn. J. Appl. Phys. 38, 4291 (1999).
- [4] M. Koshinaka and M. Toyota, Japan Patent. 270426 (1998).
- [5] I. Ohe, Japan Patent. 226296 (1993).
- [6] H. Arimoto, Japan Patent. 035449 (2000).
- [7] T. Miyashita et al., Japan Patent. 103575 (1996).
- [8] K. Lee, et al., U.S. Patent. 20110040508A1 (2011).
- [9] Y. Han, et al., U.S. Patent. 7728602B2 (2010).
- [10] D.J. Coumou and R. E. El-Choueiry, U.S. Patent. 8334700 B2 (2012).
- [11] P.R. Buda et al., U.S. Patent. 20080021664A1 (2008).
- [12] A.F. Krauss, U.S. Patent. 7988833B2 (2011).
- [13] M. Yasaka et al., Jpn. J. Appl. Phys. 42, L157 (2003).
- [14] M. Yasaka and M. Takeshita, U.S. Patent. 6753499 (2004).
- [15] M. Yasaka and M. Takeshita, Japan Patent. 173896 (2003).
- [16] M. Yasaka and M. Takeshita, Japan Patent. 173897 (2003).
- [17] M. Yasaka *et al.*, Proc. Int. Symp. Semiconductor Manufacturing. p. 33, Tokyo (2004).
- [18] M. Yasaka et al., Jpn. J. Appl. Phys. 39, L1286 (2000).
- [19] M. Yasaka *et al.*, Proc. Int. Symp. Semiconductor Manufacturing. p. 337, Tokyo (2002).
- [20] T. Miyano et al., J. Phys. D. 41, 035209 (2008).
- [21] Y. Kasashima et al., The Encyclopedia of Plasma Technology

II (CRC Press, Taylor & Francis, New York, 2017) p. 1517.

- [22] Y. Kasashima *et al.*, J. Vac. Soc. Jpn. 57, 24 (2014).
 [23] Y. Kasashima *et al.*, IEEE Trans. Semicond. Manuf. 52,
- 350 (2013).
- [24] Y. Kasashima et al., Jpn. J. Appl. Phys. 53, 03DC04 (2014).
- [25] T. Tabaru *et al.*, Japan Patent. 185681 (2011).
- [26] I. Ohshima et al., J. Appl. Phys. 45, 5169 (2006).
- [27] M. Akiyama et al., Appl. Phys. Lett. 92, 043509 (2008).
- [28] M. Akiyama et al., Appl. Phys. Lett. 90, 151910 (2007).

- [29] R.C. Turner et al., Appl. Acoustics. 41, 299 (1994).
- [30] R.K. Miller and E. v. K. Hill, Nondestructive Testing Handbook: Acoustic Emission Testing 3rd ed. ed. P.O. Moore, (American Society for Nondestructive Testing, Inc., Columbus, 2005) Vol. 6, Chap. 2, p. 80.
- [31] M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing 2nd ed. (Wiley-Interscience, New Jersey, 2005) Chap. 11, p. 430.

小特集 半導体デバイスの製造品質を裏から支えるプロセスプラズマの隠れた技術 イ.プラズマの負荷インピーダンスを利用したプロセス中の 異常放電の検出技術

4. Micro-Arc Discharge Detection Method in Plasma Process by Monitoring Load Impedance

國家 真 治, 佐藤 周 作, 木村 直 也, 若 本 悟, 笠 嶋 悠 司¹⁾,本村大成¹⁾,田 原 竜 夫¹⁾,上杉 文 彦²⁾ KUNIIE Shinji, SATO Shusaku, KIMURA Naoya and WAKAMOTO Satoru, KASASHIMA Yuji¹⁾, MOTOMURA Taisei¹⁾, TABARU Tatsuo¹⁾ and UESUGI Fumihiko²⁾ 株式会社アドバンテスト 新企画商品開発室,¹⁾国立研究開発法人 産業技術総合研究所 製造技術研究部門, ²⁾国立研究開発法人 産業技術総合研究所 九州センター

(原稿受付:2019年12月2日)

プラズマエッチング工程の歩留まりや総合設備効率を悪化させる主要因として,異常放電や異常放電等により剥離したパーティクルが挙げられる.チャンバー内のプラズマインピーダンスの計測により,プラズマの放電状態のモニタリングや異常放電を検出する計測システムを開発したので紹介する.

Keywords:

plasma process, plasma impedance, microarc discharge, particle, network analyzer

4.1 はじめに

半導体の量産ラインでは、パーティクルによる歩留まり 悪化や総合設備効率の改善がプラズマエッチング工程の課 題となっている.チャンバー内で発生するパーティクルの 原因としては、プラズマプロセス中に内壁に堆積した反応 生成物の剥離や異常放電による飛散、内壁がプラズマに曝 されて腐蝕することによる剥離などが挙げられる.チャン バー内の堆積物や内壁の状態をプラズマインピーダンスの 変化としてモニタリングしパーティクルが発生する前にク リーニングを実施する予知保全、異常放電を検出しパー ティクルの発生を予知しダメージが想定されるウェハの次 工程への流出を防止する技術の開発が強く求められている.

プラズマインピーダンス測定技術は従来,高電圧・電流 プローブによる測定が研究提案されているが,チャンバー や自動整合器への加工が必要となり,エッチングレシピへ の影響が懸念される.我々は量産ラインで設置稼働中のプ ラズマエッチング装置に対しても,チャンバーや自動整合 器には手を加えずに,プラズマインピーダンス測定,およ び異常放電を検出可能なプラズマインピーダンス測定シス テムを開発してきた[1-4].本システムの特長は,高周波電 源と自動整合器を繋ぐ同軸ケーブルに方向性結合器を取り 付けるのみで既存装置に導入可能な点にある.これまで に,異常放電やウエハ吸着不良といったプロセス中の異常 検出や内壁状態のモニタリングへの有効性を実証してきた. 本章では,本システムを量産ラインへより導入容易にす るために進めている, 簡便・小型な測定システムの開発の 取り組みについて紹介する. 高周波インピーダンス測定の 基本であるネットワークアナライザを使ったインピーダン ス測定を4.2節で解説し, ネットワークアナライザでの測定 値と自動整合器の可変容量コンデンサ情報からプラズマイ ンピーダンスを算出し, プラズマインピーダンスの急激な 変化から異常放電を検出する技術を4.3, 4.4節で解説する.

4.2 ネットワークアナライザを用いた,反射法に よるインピーダンス測定について

伝送路を進む信号を考えた場合,例えば直流回路の様な 伝送路長が信号の波長に比べて十分に短いときは,伝送路 上の電圧分布は一定であり,集中定数として考えることが できる.一方で波長の短い高周波信号では電流・電圧が波 動の様に振る舞うために,伝送路途中でインピーダンスが 異なると,その地点で反射が生じ,入射波と反射波により 定在波が発生して伝送路上に電圧分布が生じる.高周波信 号ではこれら経路上の電圧・電流の分布を考慮するが,伝 送路全点の分布ではなく,伝送路を2ポート対としてとら えるSパラメータ(Scattering parameter)の考え方が広く 用いられている.

Sパラメータのイメージを図1に示す. 伝送路を2ポート対(点線部)に簡易化し,特性インピーダンスを接続した状態で,入射波,反射波,伝送波から S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22} を導出する. Sパラメータはネットワークアナライザの

Advantest Corp., Saitama R&D Center, SAITAMA 349-1158, Japan

corresponding author's e-mail: Shinji.kuniie@advantest.com

基本的な測定項目でもある.

4 種類のSパラメータのうち,入力反射係数*S*₁₁からイン ピーダンス *Z* を求める方法について解説する.

図1の行列式の反射波 *b*₁ 項を展開すると次式が得られる.

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \tag{1}$$

ポート2端は特性インピーダンス Z_0 で終端しているため に反射は生じない.即5 $a_2 = 0$ であり、 S_{11} は次式となる.

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}$$
 (2)

次に,入射波 a₁ と反射波 b₁ の位相差 δθ を次式とする.

$$\delta\theta = \theta_{b1} - \theta_{a1} \tag{3}$$

δθ を用いると反射係数 Γ は次式で表せる.

$$\Gamma = \frac{b_1}{a_1} e^{-j\delta\theta} \tag{4}$$

そして反射係数ΓとインピーダンスZには次式の関係が成 り立つ.

$$Z = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} Z_0 \tag{5}$$

これらの関係からインピーダンス Z が導出され, 整合に必要な条件を求めることができる.

実際にネットワークアナライザで試験対象(DUT)の入 力端からインピーダンスを測定する場合の接続方法を図2 に示す.信号源Sをパワースプリッターで分け,片方を基 準信号 R に入力し,他方を,方向性結合器を介して DUT の入力ポートへ接続する.DUT からの反射信号は方向性 結合器で受けて A に入力する.図2では S_{11} を測定するた めに,DUT の入力ポート対に接続しているが,DUT の出 力ポート対は特性インピーダンス Z_0 の終端抵抗で終端さ れている.この評価系により基準信号 R と反射信号 A から Γ を求めてインピーダンス Z が導出される.

図2 ネットワークアナライザによる反射測定接続図.

信号源と負荷とでインピーダンス整合が得られていない 場合は、両者の間に整合回路を設けて本反射法で測定し、 スミスチャートモードにて表示することで、ネットワーク アナライザの画面をモニタしながら伝送路の整合状態を把 握でき、また、整合回路の定数決定を効率的に行える.

 S_{11} は複素数であるが, S_{11} の絶対値を対数表現したもの をリターンロスといい、スミスチャートと共に整合の度合 いを評価する指数として一般的に使われる.

4.3 プラズマインピーダンス測定

チャンバー内部の状態を外部から簡便,正確に確認,また,監視する方法として,プラズマインピーダンス測定に よるモニタが適している.本節ではプラズマインピーダン スの測定を可能にするシステムの構成,および原理につい て説明する.

4.3.1 プラズマエッチング装置の基本構成

プラズマエッチング装置は高周波電源,自動整合器, チャンバーで構成されている(図3).高周波電源より出 力された RF 電力はチャンバーに供給されるが,高周波電 源とチャンバーのインピーダンスは異なるため,接続面で 反射が生じ,チャンバーに効率よく電力の伝達を行うこと ができない.このため,高周波電源とチャンバーの間に整 合を担う自動整合器が挿入されている.自動整合器は,入 力された電力とチャンバーで反射された電力を検出,入力 電力と反射電力の関係が一定値以下になるように動作す る.この動作の結果,自動整合器入力端のインピーダンス は常に50Ω前後に,出力インピーダンスはチャンバーの入 力インピーダンス(以下,プラズマインピーダンス)に整 合された状態に保たれ,高周波電源からチャンバーへ効率 の良いエネルギー伝達が行われる.

図3 プラズマエッチング装置構成.

Special Topic Article

4.3.2 プラズマインピーダンス測定系の構成と測定原理

プラズマインピーダンスを測定するシステムには以下が 要求される.

- 1. プラズマに対して非接触
- 2. リアルタイムな測定が可能
- 3. 高精度に異常を早期発見できる
- 4. 量産装置への取り付けが容易

プラズマインピーダンスはチャンバー入力端のインピーダ ンスなので、本来ならば自動整合器とチャンバーの間に測 定のための工夫をする必要があるが、装置を改造すること 無しにこの間に測定系を挿入することは不可能であり、別 の方法を考える必要があった。そこで高周波電源と自動整 合器間に方向性結合器を挿入して、自動整合器入力端の入 射電力、および反射電力それぞれを、ネットワークアナラ イザ R3755 シリーズを使用し測定した(図4). R3755 シ リーズは本件のように装置組み込みに最適化した小型の ボード型ネットワークアナライザである。

自動整合器の入力端での測定において問題になるのは, 前述したように,自動整合器の動作により,自動整合器の 入力端のインピーダンスは常に50Ω程度になってしまうこ とである.自動整合器の入力端のインピーダンスは,自動 整合器,チャンバーそれぞれの合成インピーダンスになる ため,変化していくプラズマインピーダンスを算出するに は,測定されたインピーダンスから,自動整合器内部の整 合回路分を除く必要がある.

自動整合器の等価回路は図5に示すように固定インダク タと可変容量コンデンサで構成されている.可変容量コン デンサはモーター制御されており,自動整合器より出力さ

れている位置情報モニタ電圧を測定することで設定値を知ることができる. 図中の Z_{CIM} をネットワークアナライザで測定されたインピーダンス, Z_L をプラズマインピーダンス とすると,これらのインピーダンスは図6の関係をもつ. ここで Z_{CIM} , Z_L は共に複素インピーダンスである.よって,この式にネットワークアナライザの測定値 Z_{CIM} ,自動整合器内部の固定インダクタ値 L_1 , L_2 ,可変容量コンデン サ値 C_1 , C_2 を代入すれば,プラズマインピーダンス Z_L が求まる.

このようにして、自動整合器入力端での測定結果をプラ ズマインピーダンスに変換することが可能になる[1].

4.3.3 プラズマインピーダンス測定用ソフトウエア

測定には専用のアプリケーションソフトウエアを使用す る.本ソフトウエアはネットワークアナライザを使用した プラズマエッチング装置のプラズマインピーダンス測定を 可能にするソフトウエアである(図7).条件設定画面に て,使用する方向性結合器の結合度,自動整合器の固定イ ンダクタのインダクタンス値,自動整合器の可変容量コン デンサの容量範囲と制御電圧範囲等の情報を事前に入力し ておけば,ネットワークアナライザの測定結果から,プラ ズマインピーダンスを算出する.

図8はプラズマの発光に揺らぎがあり異常状態にあるプ ラズマエッチング装置のプラズマインピーダンスを測定し た結果である.プラズマの発光の揺らぎが,プラズマイン ピーダンスの実数成分の変化として観測できている.プラ ズマインピーダンスを測定することで,簡単にプラズマ放 電の状態を把握することができる.

クリーニング時の大気暴露による内壁の水分吸収がプラ ズマインピーダンスの変化として現れることも知られてい る[2-4]. 今後, さらなるデータの蓄積と分析を行えば, 放電状態やチャンバー内壁の汚染状態を判断する基準が明 確になり, 異常を発生させないためのクリーニングのタイ

図6 ネットワークアナライザの測定値とプラズマインピーダン スの関係式[1].

図7 プラズマインピーダンス測定用ソフトウエア.

ミングを確立することが可能と考える.

4.4 異常放電検出

プラズマインピーダンス測定システムは、プラズマや チャンバーの状態をモニタするだけでなく、異常放電を検 出し、その発生前後のインピーダンスを測定することも重 要な目的の一つである.異常放電を検出することで、ダ メージが想定されるウェハの次工程への流出を防止する、 また、異常放電がおこる前兆を把握し異常放電発生を未然 に防ぐ方策を見つけ出すためである.本節ではチャンバー 内壁堆積物を飛散させる原因の一つと考えられている異常 放電について、プラズマインピーダンス測定システムを使 用した検出への取り組みについて説明する[2].

異常放電のような突発的で短時間な反応はモーター制御 で動作する自動整合器では追従できない.異常放電を確実 に検出する機能を実現するためには、この突発的な現象に 十分反応できる高速な動作がプラズマインピーダンス測定 システムには要求される.この瞬間的な現象の捕捉はネッ トワークアナライザに検波器を搭載することで可能になる.

異常放電が起こると、自動整合器の入力端の不整合とし て方向性結合器の反射波検出ポートに反射信号が発生す る.その反射波を検波器で検出し、異常放電が発生したフ ラグとしてネットワークアナライザでのインピーダンス測定 値とともに管理する.このようにすれば、どの測定の時に 異常放電が発生し、その前後のプラズマインピーダンスが どのようにふるまっているかを確認することが可能になる.

そこで,実際の異常放電が数μsの半値幅を持ち,放電の 瞬間のプラズマインピーダンスは極めて低くなると仮定し て,整合が取れた状態から1μs間の不整合の状態が生じた 場合のシステムの応答能力の確認を行った. **図9**に模擬異 常放電に対するシステムの応答能力確認のための測定系を 示す.50Ωで終端された信号ラインとGND間にスイッチを 設け,このスイッチをパルス幅1μsのパルスでON/OFF させて,整合状態,不整合状態を切り替える.図中のス イッチがOFFでは整合が取れた状態になるため,方向性結 合器の反射波観測ポートには反射波は現れない.スイッチ ONにして1μs間GNDにショートして,整合状態を崩し, 反射波を発生させている.

図10 (a),図10 (b) は図9の測定系で異常放電に見立て た応答を捕らえた S₁₁ の波形である.異常放電に見立てた 応答を確実に捉えている.

図10(a) 応答性能確認時のリターンロス波形.

図10(b) 応答性能確認時のスミスチャート.

アナログスイッチのON抵抗の影響により,全反射(0Ω) にはなっていないが,正常状態と異常状態ははっきりと捉 えられており,異常放電の直前直後は整合状態であること が確認できる.

プラズマが安定し正常放電している状態でも,プラズマ インピーダンスは少しずつ変動するので,自動整合器が整 合操作を行う.そのため自動整合器端のインピーダンスは 50Ω丁度にはならず,数Ω程度変動する.この変動と異常 放電による反射波と識別するため,反射波の検出閾値をリ ターンロス値で 20 dB から 25 dB 程度に設定するのが適切 と考える.図8の実測データを取得した装置の正常状態か らリターンロス値で20 dBから25 dB程度までの悪化は,プ ラズマインピーダンスが急峻に1から0.5Ω程度変動した状 態に相当する.

このように本プラズマインピーダンス測定システムを使 用すれば、高感度で異常放電の検出が可能となり、プラズ マエッチング装置の状態を、装置を改造することなく、正 確かつ高速に監視していくことが可能になる.

4.5 おわりに

本章では、開発したプラズマインピーダンス測定システ ムにより、簡単にプラズマ放電の状態を把握することがで きることを示した.また,プラズマインピーダンス計測技 術を応用し,突発的に発生する異常放電を検出し,損傷の 可能性があるウェハの次工程への流出防止の可能性も確認 した.今後は,実際の量産装置に組み込んで各種条件での プラズマインピーダンス,異常放電データを蓄積し,シス テムの完成度を上げていく予定である.

参考文献

- [1] T.Motomura et al., Rev. Sci. Instrum. 85, 026103 (2014).
- [2] Y.Kasashima et al., Appl. Phys. Express 7, 096102 (2014).
- [3] Y.Kasashima et al., Jpn. J. Appl. Phys. 54, 060301 (2015).
- [4] Y.Kasashima and F. Uesugi., J. Vac. Soc. Jpn. 59, 270 (2016).

5. プラズマエッチング耐性に優れる 新規セラミックスの材料開発と実用化

5. Development of High Corrosion Resistance Ceramics for Chamber Parts in Mass-Production Plasma Etching Equipment

笠 嶋 悠 司,上 杉 文 彦¹⁾ KASASHIMA Yuji and UESUGI Fumihiko¹⁾ 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 製造技術研究部門, ¹⁾国立研究開発法人 産業技術総合研究所 九州センター (原稿受付: 2019年12月02日)

半導体量産ラインにおけるプラズマエッチング装置のチャンバー内ではセラミックス製の部品が多用され ているが、プロセス環境下での腐食が歩留りや装置稼働率を低下させる一因となっている.酸化アルミニウムや 酸化イットリウム等を部材としたセラミックス製部品は、プラズマエッチング環境下に長時間曝されることに よって腐食していく.それがパーティクルの発生やチャンバー内汚染の原因となり、洗浄や部品交換等のメンテ ナンスが必要となる.そのため量産ラインでは耐腐食性に優れた新規部材が強く望まれている.このような背景 の下、我々は新たなセラミックス部材として酸化マグネシウム系セラミックスを開発したので本章で紹介する.

Keywords:

plasma etching, magnesium oxide based ceramics, chamber parts, corrosion resistance, conductive ceramics

5.1 はじめに

LSI(大規模集積回路)量産ラインにおけるプラズマ エッチング装置のプロセスチャンバー内では、Si, SiO₂, SiC や酸化アルミニウム (Al₂O₃) 等の部材がシャワーヘッ ド、フォーカスリング、シールドリングといった部品に多 用されている. セラミックス製部品はハロゲン系ガスを用 いた反応性プラズマエッチング環境に長時間曝されること によって腐食され摩耗し、パーティクル発生源やチャン バー内汚染源となるなど、製造歩留りや装置稼働率の低下 の原因となる.使用可能期間(部品寿命)が短い部品は交 換サイクルが短くなり、製造コストの増加を招く. プラズ マエッチング工程で発生するパーティクルは製造歩留りや 装置稼働率低下の主要因であり[1-16], セラミックス部材 の腐食によって発生するパーティクルは第2章で述べた反 応生成物堆積膜の剥離によるパーティクルとともに主要な 発生起源である.パーティクルは製造歩留りを大きく低下 させるため、 量産ラインでは腐食されにくく部品寿命が長 い新規セラミックス部材が強く望まれている.

既存のセラミックス部材として長年使用されてきた Al₂O₃に代替する部材として、より高いプラズマ耐性を有 する酸化イットリウム (Y₂O₃)の利用が近年広がっている [17-22].しかしながら、Y₂O₃はレアアースであるイット リウムを含むために安定供給面で懸念があり、かつ高コス トになる.また材料として高密度焼結体の製造が難しいこ

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

と,機械的強度(曲げ強度や硬度)が低いといった欠点がある.そのため製造現場では Y₂O₃ にも代わる新規部材が 求められている.

チャンバー部品に用いられるセラミックス部材の物性と して,機械的強度等の物理的物性に加えて導電率も重要な 物性である.シャワープレートやフォーカスリング,チャ ンバー内壁部材といった各種部品に適用するためには広範 囲に亘る様々な導電率が求められる.また,高導電率を有 する部材は異常放電の抑制やそれに伴うパーティクル発生 を低減することが可能な利点を持つ[11-14].

そこで我々は、新規セラミックス部材として酸化マグネ シウム (MgO) 系セラミックスを開発した[23].本章で は量産用プラズマエッチング装置を用いた当該新規部材の 評価結果について報告する.

5.2 実験方法

セラミックス部材の耐プラズマ評価実験は半導体量産用 の平行平板型リアクティブイオンエッチング(Reactive Ion Etching(RIE))[24]装置で実施した.プロセス条件は 量産ラインと同等な条件を設定可能であり、本研究ではプ ロセスガスはCF4、ガス圧力10Pa、電極間距離11mm、高 周波電力1000Wに設定した.1回のエッチング時間は60 秒とし、計130回(130分間)のエッチング処理を実施した. サンプルとしてはMgO系セラミックス開発材料に加え、

corresponding author's e-mail: kasashima-yuji@aist.go.jp

Special Topic Article 5. Development of High Corrosion Resistance Ceramics for Chamber Parts in Mass-Production Plasma Etching Equipment Y. Kasashima and F. Uesugi

比較評価用として Si, Al₂O₃, Y₂O₃ を使用した. Si は市販 の直径 200 mm ウエハから直径 30 mm に切り出して使用し た.各セラミックスサンプルは粉末冶金にて図1の通り直 径 30 mm,厚さ4 mm となるように製作した.下部電極 (ウエハステージ)上にはウエハの代わりに直径 200 mm のアルミナ製基板を搭載し,その上に各サンプルを配置し た.エッチング処理による損耗量を評価するため,各サン プルは図1に示す通り表面半分をポリイミドテープでマス キングした.エッチング処理終了後には当該ポリイミド テープを慎重に剥がし,エッチング処理面(非マスキング 表面)とマスキング面との段差をエッチングによる損耗量 として評価した.段差の測定には表面粗さ計(東京精密製, SURFCOM2800)を使用した.表面の観察は SEM(日立ハ イテクノロジーズ製,S-3400N)及びレーザー顕微鏡 (キーエンス製,VK-X210)を用いた.

5.3 実験結果

5.3.1 MgO 系セラミックスの開発

MgO はレアアースを含まず Y₂O₃に比べて低コストでの 製造が可能であるため、MgO 系セラミックスへの代替に よって量産ラインにおけるメンテナンスコストの低減が期 待できる. 一方で一般的な MgO は機械的強度が低いため, そのままチャンバー部品として用いることは困難である. 例えば、一般的な Al₂O₃ はビッカース硬さ 1600 Hv, 曲げ強 度 350 MPa 程度であるのに対し, MgO は高密度焼結体の 場合でもビッカース硬さ550 Hv,曲げ強度250 MPa程度で ある. そこで MgO系セラミックスの開発にあたり, まずは 機械的強度の向上に取り組んだ.結果としては、MgO に MgAl₂O₄相とYAlO₃相を加えたMgO-MgAl₂O₄-YAlO₃複合 焼結体を粉末冶金にて製造することで機械的特性を向上さ せることに成功した.更にその特性は MgAl₂O₄ と YAlO₃ の含有量によって制御が可能である. 図2(a), (b)はそれ ぞれ SEM で観察した単結晶 MgO 焼結体と MgO-21% MgAl₂O₄-15%YAlO₃ 複合焼結体(本章では以降 NMA-1 と称す)の画像である. 焼結体の製造方法は同一である. 図2(a)の単結晶に比べて図2(b)の複合焼結体は粒径が 小さくなっていることがわかるが,これは MgAl₂O₄と YAlO3の添加によって焼結プロセスにおける粒成長が抑制 された結果である.図3はレーザー顕微鏡で観察した

図1 セラミックスサンプル概略図 (参考文献[23]の図1を引 用). Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

NMA-1の鏡面である.NMA-1は均一かつ緻密な構造であ ることが示されている.なお画像中に見える白色の点は YAIO₃の結晶である.**表**1にNMA-1,単結晶MgO,Y₂O₃ の曲げ強度及びビッカース硬さを測定した結果を示す. NMA-1はいずれの特性も単結晶MgOとY₂O₃に比べて大き いことがわかる.これらの優れた機械的特性は,MgAl₂O₄

図2 (a)単 結 晶 MgO 焼 結 体,(b)MgO-21%MgAl₂O₄-15% YAIO₃ 複合焼結体 (NMA-1)の SEM 画像 (参考文献[23]の 図 2 を引用). Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

図3 レーザー顕微鏡で観察したMgO-21%MgAl₂O₄-15% YAIO₃ 複合焼結体(NMA-1)の鏡面画像(参考文献[23]の 図3を引用). Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

表1 NMA-1, 単結晶 MgO, Y₂O₃の機械的特性(曲げ強度及び ビッカース硬さ).

機械的特性	NMA-1	単結晶 MgO	Y_2O_3
曲げ強度 (MPa)	554	250	200
ビッカース硬さ (HV)	929	550	800

と YAIO₃の添加による粒成長の抑制及び緻密な焼結体に よって得られた特性である.

先述の通り、チャンバー部品として実用化するためには 機械的特性に加えて導電率も重要な指標になる.そこで 我々は導電性 MgO 系セラミックの開発に取り組んだ.導 電性は炭素を添加することで発現させた.NMA-1の抵抗 率は $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上であるが、炭素の添加量を変えること によってその値を制御すること可能である.例えば、炭素 を 3 %添加した MgO - 21% MgAl₂O₄ - 15% YAlO₃ - 3% C複合 焼結体 (以降 NMA-2 と称す) は $10^{0} \Omega \cdot \text{cm}$ オーダーの抵抗 率 (高導電率)を実現した.

5.3.2 プラズマエッチング耐性の評価

MgO 系セラミックス開発材 NMA-1 及び NMA-2 につい て既存材料 Si, Al₂O₃, Y₂O₃ とともにプラズマエッチング 耐性を評価した. **図4**にその評価結果を示す. なお縦軸は Al₂O₃のエッチング量を用いて相対比較できるようにして いる.エラーバーは各サンプルの面内ばらつきである.本 結果より,各セラミックスサンプルは,Siに比べて極めて 小さいエッチング量であることがわかる.更に,開発材 NMA-1 及び NMA-2 はいずれも Al₂O₃ よりもエッチング量 が小さいだけでなく,わずかながらも Y₂O₃ よりも小さい ことが示されている.すなわち,開発材 NMA-1 及び NMA-2 は既存材料に対して高いプラズマ耐性を有するこ とが明らかとなった.

図5(a)-(d)はそれぞれレーザー顕微鏡で観察したSi, Al₂O₃, Y₂O₃及びNMA-1の表面画像である.各画像におい て左側はマスク面,右側がエッチング面である.Si,

図 4 各サンプル材料の被エッチング量(対 Al₂O₃ 比)(参考文献 [23]の図 4 を引用). Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

図5 レーザー顕微鏡による表面観察画像 (a) Si, (b) Al₂O₃, (c) Y₂O₃, (d) MgO-21%MgAl₂O₄-15%YAIO₃ 複 合 焼 結 体 (NMA-1)(参考文献[23]の図 5 を引用). Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

Al₂O₃, Y₂O₃ はいずれもエッチングによって表面状態が荒 れているのに対し, NMA-1 の表面荒れはその程度が小さ い様子が見て取れる.これらの画像からも MgO 系セラ ミックス開発材は既存材料に対して優位性を持つことが明 らかである.

各サンプルに対するエッチング量の差異は、CF4 プラズ マにおいて材料表面で起こる反応と表面からのフッ化物の 揮発によって説明できる[25]. Si, Al₂O₃, Y₂O₃ 及び MgO に対して生成される主要フッ化物はそれぞれ SiF4, AlF3, YF3及びMgF2であり、その標準生成エンタルピーは -1146, -578, -734, -522 kJ/mol と見積もることがで きる[26,27]. また標準ギブスエネルギーはそれぞれ -1105, -553, -747, -517 kJ/mol と見積もることがで きる[26-29]. したがって,標準生成エンタルピー及びギブ スエネルギーがともに最も低いSiF4はその生成反応が最も 容易に進む. セラミックス製サンプルの中では YF3の値が 両方とも最も低く, すなわちその生成反応は最も進み易 い. また AlF₃と MgF₂ は各値ともに同様な値である. ここ で重要な点としては全ての値が負であること、つまりこれ らのフッ化物の生成反応は自発的に進むことである.ま た, 上記に加えて重要な物性値は各フッ化物の沸点であ り、SiF₄、AlF₃、YF₃及びMgF₂についてそれぞれ-95、 1300, 2200, 2200℃である[17,30-33]. これらの値より YF₃及び MgF₂は SiF₄と AlF₃よりも蒸発しにくいことが わかるが、このことより図4の結果でY2O3及びMgOに対 するエッチング量がSiとAl₂O₃よりも小さくなったことを 理解できる. そして開発材 NMA-1 及び NMA-2 のエッチン グ量がY2O3より小さいのは、上記の通りYF3の生成反応が MgF2の生成反応よりも進み易いためである.

5.4 まとめ

半導体量産用プラズマエッチング装置のチャンバー部品 に用いる新規セラミックス部材として,MgO系セラミッ クス材料を開発した.本材料の機械的特性は硬度及び曲げ 強度ともに既存材料よりも優れることが確かめられた.広 範囲にわたって抵抗率を変えることにも成功し,低抵抗率 (高導電率)材料(~10⁰Ω·cm)及び高抵抗率(低導電率)材 料(>10¹⁴Ω·cm)ともにCF₄ガスを用いたプラズマエッチン グに対して高い耐性を示した.この新規MgO系セラミッ クス材料は硬度,曲げ強度,抵抗率など各種用途に応じた チャンバー部品に用いることが可能であり,フォーカスリン グやシャワープレート等への適用が期待できる.量産ライ ンにおける製造コスト低減への貢献が可能な部材であり, 製品実用化に向けた取り組みを進めている.また,導電性 材料は異常放電やパーティクルの抑制効果が期待されるた め今後の研究課題としてその実証に取り組む予定である.

参考文献

- [1] N. Ito et al., Jpn. J. Appl. Phys. 47, 3630 (2008).
- [2] F. Uesugi et al., J. Vac. Sci. Technol. A 16, 1189 (1998).
- [3] N. Ito et al., J. Vac. Sci. Technol. B 16, 3339 (1998).
- [4] T. Moriya et al., J. Vac. Sci. Technol. A 18, 1282 (2000).
- [5] T. Moriya et al., J. Vac. Sci. Technol. B 22, 2359 (2004).
- [6] H.-S. Jun, Jpn. J. Appl. Phys. 52, 066203 (2013).
- [7] G. Lapenta and J.U. Brackbill, Plasma Sources Sci. Technol. 6, 61 (1997).
- [8] S.J. Choi et al., Plasma Sources Sci. Technol. 3, 418 (1994).
- [9] M.A. Hussein and R.B. Turkot, Jr., IEEE Trans. Semicond. Manuf. 19, 146 (2006).
- [10] G.S. Selwyn, Plasma Sources Sci. Technol. 3, 340 (1994).
- [11] Y. Kasashima et al., Jpn. J. Appl. Phys. 54, 01AE02 (2015).
- [12] Y. Kasashima et al., Jpn. J. Appl. Phys. 53, 040301 (2014).
- [13] Y. Kasashima and F. Uesugi, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 110308 (2014).
- [14] Y. Kasashima et al., Jpn. J. Appl. Phys. 52, 066201 (2013).
- [15] Y. Kasashima et al., Jpn. J. Appl. Phys. 54, 060301 (2015).
- [16] Y. Kasashima and F. Uesugi, J. Vac. Soc. Jpn. 59, 270 (2016).
- [17] K. Miwa et al., J. Vac. Sci. Technol. A 27, 831 (2009).
- [18] J. Iwasawa et al., J. Am. Ceram. Soc. 90, 2327 (2007).
- [19] X.P. Qin et al., Ceram. Int. 38, 2529 (2012).
- [20] D.M. Kim et al., Thin Solid Films 519, 6698 (2011).
- [21] D.M. Kim et al., J. Am. Ceram. Soc. 94, 3455 (2011).
- [22] Y.-C. Cao et al., Appl. Surf. Sci. 366, 304 (2016).
- [23] Y. Kasashima et al., Jpn. J. Appl. Phys. 56, 06HC01 (2017).
- [24] M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing 2nd ed. (Wiley -Interscience, New Jersey, 2005) Chap. 15, p. 571.
- [25] M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing 2nd ed. (Wiley, New York, 2005) Chap. 7.
- [26] M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing 2nd ed. (Wiley, New York, 2005) p. 212.
- [27] C. Liu et al., Phys. Chem. Chem. Phys. 15, 6350 (2013).
- [28] S.L. Matlow, U.S. Patent. 5328556 (1992).
- [29] T.B. Reed, Free Energy of Formation of Binary Compounds: An Atlas of Charts for High-Temperature Chemical (MIT Press, Cambridge, MA, 1971) Chap. 3.
- [30] L. Pauling, *General Chemistry* (Dover, New York, 1988) p. 398.
- [31] E. Wiberg and N. Wiberg, *Inorganic Chemistry* (Academic Press, New York, 2001) p. 1322.
- [32] R.C. Ropp, *Encyclopedia of the Alkaline Earth Compounds* (Elsevier, Amsterdam, 2013) p. 43.
- [33] M. Wakaki et al., Physical Properties and Data of Optical Materials (CRC Press, Boca Raton, FL, 2007) p. 275.

●●● 小特集 半導体デバイスの製造品質を裏から支えるプロセスプラズマの隠れた技術

6. おわりに

6. Conclusion

上杉文彦

UESUGI Fumihiko 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 九州センター (原稿受付:2019年12月5日)

今回の小特集では半導体産業の分析に基づいて、デバイ スメーカの視点でレガシーファブ(Legacy Fab)の量産ラ インで収益を上げるために必要な技術について述べた.収 益を最も落とす原因の1つであるプラズマプロセス、特に プラズマエッチングプロセス・装置に関して、3種類の技 術が必要なことを述べた.本小特集を終えるに当たり、3 種類の技術について、課題と今後の見通しについて述べ る.

第1の不良発生の抑止・予知保全ではパーティクルや異 常放電が解決すべき重要課題であることを述べた.文献 [1]を契機として,内壁への堆積膜に起因する剥離パー ティクル,プラズマと内壁との反応による腐蝕パーティク ル,異常放電によるパーティクルの発生メカニズムの解明 が進んだ.また,メカニズムとそれに基づくモニタ手法に ついて,実際の量産用プラズマエッチング装置を用いた研 究開発の結果について本小特集の第2,3,4章で紹介し た.

各種パーティクルや異常放電の検出,チャンバー内壁の 状態のモニタ手法として音響センサによる振動計測,プラ ズマインピーダンス計測が有効なことを第3,4章で述べ た.研究開発成果を実用化するには,研究機関と計測器 メーカとの協働が重要なことはいうまでもないが,実際に 使用する量産ラインを保有するデバイスメーカの生産部門 との協働が不可欠である.現実のユーザが参加すること で,測定できるというレベルから,量産ラインでの使い方 に合わせた計測システムの機能やソフトウエアの仕様が明 確になり,サプライヤーとしての計測機器メーカとユーザ であるデバイスメーカの双方の開発・実用化の効率が高ま ると期待される.

プラズマインピーダンス計測システムを例にとると,装 着するのはプラズマ装置であるから,製造装置メーカとの 協働も必要である.第1章で述べたように,300mm量産 ラインを使用するデバイスメーカはコスト・リーダーシッ プ戦略をとり積極的な投資をして量産ラインを増設して市 場獲得をめざす台湾,韓国の半導体メーカが中心になって いる.ビジネスの観点から見れば,製造装置メーカも有力 顧客向けに 300 mm ウエハ用製造装置に特化した活動にな る. 一方で,200 mm 以下のレガシーファブは集中戦略を とり,収益性向上をめざすため,製造設備の導入を積極的 に行うことは困難である.製造装置メーカは 200 mm やそ れ以下の製造装置は製造中止,もしくは新規開発を行いに くい状況になっている.このような状況の中で,第1章の 図2に示すように 200 mm 量産ラインの需要は高まり続け ている.このギャップをどう克服するかについて,半導体 製造装置・材料の国際業界団体である SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) やグローバル な半導体生産技術者の議論や交流を行う国際学会の ISSM (International Symposium on Semiconductor Manufacturing)の ISSM2018でも議論が始まっている.今後の産業界 の大きな課題の1つである.

第2のメンテナンス費用削減と第3の装置機差の低減に よるデバイス特性の安定化を実現するには、共にプラズマ 耐性の高い材料の開発が必要である.文献[2]の、エッチ ング装置チャンバー内壁のプラズマによる腐蝕のメカニズ ムの解明を契機として、従来よりもプラズマ耐性の高い材 料への要望、さらには所望の導電率を付与できる材料への 要望が高まっている.導電率の付与では、多結晶材料の結 晶粒界に導電性を担う元素を浸透させる方法と、結晶粒そ のものに導電性を付与する方法がある.マグネシア (MgO)ベースの高プラズマ耐性材料の研究開発結果を第 5章で紹介した.

プラズマ耐性を高めるには内壁材料の脆弱なのはどこか を知ることが必要である.チャンバー内壁の材料は多結晶 構造を持っている.結晶粒は単結晶と考えて良く,結晶粒 と結晶粒の境である結晶粒界は転位や転位の集合と考える ことができる.このあたりの解説は文献[3,4]が参考にな る.多結晶は,適したエッチング液に浸漬すると転位端が エッチングされてエッチピットができることも知られてい る.このことは,プラズマに曝されたチャンバー内壁材料 は結晶粒界から削れていくことを示唆する.結晶粒の大き さとプラズマ耐性の関係が文献[5]ではじめて議論された. 今後の高プラズマ耐性材料の研究開発に重要な指針を与え

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Kyushu Center, Tosu, SAGA 841-0052, Japan

author's e-mail: f-uesugi@aist.go.jp

るものになると考えている.

一方,すでに文献[6-9]でシース電場起因の応力が,プラ ズマの揺らぎによって撃力としてチャンバー内壁の堆積膜 に作用し,内壁から引き剥がす向きに作用することを述べ た.特にプラズマと内壁材料の反応による腐蝕のメカニズ ムを解明するには,上述した結晶粒界での反応に加えて, 結晶粒界の弾性を含めた議論として深まっていくのではな いかと期待している.

高プラズマ耐性材料はエッチングチャンバー内壁の寿命 を延ばし、メンテナンスコスト削減の観点から重要である が、装置機差の低減によるデバイス特性の変化低減の観点 からも重要である.内壁の腐蝕が結晶粒界から進むと内壁 に凹凸ができて表面積が増えることになり、エッチング時 のウエハ上での自己バイアス電位が変化する[10].これに よってエッチング特性が変化し、デバイス特性が内壁の損 傷が進むにつれて変化することになり、デバイスの品質に 変化が出ると考えられる.内壁の削れ方は装置のチャン バーごとに異なるため、これが装置機差として現れ、デバ イス特性がどの装置でエッチングしたかで変わり品質のば らつきとして現れることになる.

このように高プラズマ耐性材料は、メンテナンスコスト という装置観点からも、また、装置機差低減によるデバイ ス品質確保の観点でも重要である。高プラズマ耐性材料の 実用化、特に 200 mm 径以下のウエハを使用するレガシー ファブのプラズマエッチング装置への展開を考えると課題 が見えてくる。高プラズマ耐性材料を使用するのは 200 mm 以下のウエハ用のエッチングチャンバー内壁であ る。先ほど述べたように、200 mm やそれ以下の製造装置 は製造中止、もしくは新規開発を行っていない。その一方 で第1章の図2に示すように 200 mm 量産ラインの需要は 高まり続けている。このことは、国内の材料メーカが高プ ラズマ耐性材料を開発しても、それを内壁材料とするエッ チング装置は海外、特に台湾や韓国のデバイスメーカに渡 り、国内のレガシーファブは恩恵にあずかれないというこ とになる.国内には大小多くの材料メーカがある.製造装 置メーカのチャンバーのメンテナンス業務のサードパー ティーとして活動できれば解決するのではないかと考えら れる.

以上,プラズマプロセス装置,特にエッチング装置の各 種パーティクル発生のメカニズム解明,異常放電や内壁状 態変化のモニタ,プラズマ耐性材料の開発について述べて きた.これらのテーマはプラズマサイエンスの観点から見 た場合は,主要テーマにならないかもしれないが,半導体 デバイスの生産技術の観点から見るときわめて重要なテー マである.デバイスメーカ,製造装置メーカはもとより, 近年は計測器メーカ,材料メーカにとっても重要になって いる.収益性を高めるという経営管理の目標を技術面から 如何に実現するかという立場で本小特集をまとめた.本小 特集を契機に生産技術の研究開発,実用化に興味を持つ同 好の士が増えることを期待している.

参 考 文 献

- [1] F. Uesugi et al., J. Vac. Sci. Technol. A 16, 1189 (1998).
- [2] N. Ito et al., Jpn. J. Appl. Phys. 47, 3630 (2008).
- [3] C. Kittel: Introduction to Solid State Physics 8th ed. (John Wiley & Sons, Inc, 2005) Chap. 21.
- [4] P. M. Anderson et al.: *Theory of Dislocations 3rd ed.* (Cambridge Univ. Press, 2017).
- [5] Y. Kasashima et al., Jpn. J. Appl. Phys. 58, 041001(2019).
- [6] Y. Kasashima et al., Jpn. J. Appl. Phys. 52, 066201(2013).
- [7] Y. Kasashima et al., Jpn. J. Appl. Phys. 53, 040301(2014).
- [8] Y. Kasashima and F. Uesugi, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 110308 (2014).
- [9] Y. Kasashima et al., Jpn. J. Appl. Phys. 54, 01AE02(2015).
- [10] M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (John Wiley & Sons, Inc. 1994) pp.368-372.

小特集執筆者紹介

うえ すぎ ふみ ひこ上杉文彦

50

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 九州 センター イノベーションコーディネーター. 工学博士 (大阪大学). 1982年 NEC ㈱入社, NEC エレクトロニクス㈱を経て, 2008年産業

20

技術総合研究所生産計測技術研究センターに入所.2017年から現職.半導体生産ラインの生産性を向上させる生産科学,なかでもプラズマエッチング装置でのパーティクルや異常放電発生の計測,これら発生の予知保全や解決に関する研究開発をすすめてきました.また,MOT(技術経営)の立場で,研究開発成果を企業と共同で製品化,実用化,事業化を推進しています.

笠嶋悠司

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 製造 技術研究部門 センサシステム技術研究グルー プ 主任研究員.博士(工学).入所以来,半導 体量産ラインにおける製造効率向上を目指し

た研究開発に携わっており,特にプラズマエッチングプロセスを対象として日々活動しております.国研としての役割や 立場を意識し,いかに産業界へ貢献すべきかを考えながら取り組んでおります.

たばるたつお田原竜夫

産業技術総合研究所 製造技術研究部門 センサシステム技術研究グループ 研究グルー プ長.博士(工学).専門は耐熱構造材料.現 在は薄膜圧電体のセンシング応用に関する研

究,ならびに生産設備や製造プロセスの状態診断技術の開発 に従事.

國家真治

株式会社アドバンテスト.RF 計測器のハード ウェア開発を行っている.

さとうしゅうさく佐藤眉作

 \sim

株式会社アドバンテスト.テラヘルツを利用 した計測器開発を経験し,現在は無線技術を 使用した計測器の開発を行っている.

* 村 直 也

株式会社アドバンテスト.ネットワークアナ ライザ等の RF 計測器のソフトウエア開発を 行っている.

若本 悟

株式会社アドバンテスト.ネットワークアナ ライザの開発を行っている.従来の使われ方 にとらわれず常に新しい分野での応用を考え ています.

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 製造 技術研究部門 センサシステム技術研究グルー プ 主任研究員.博士(工学).最近は主に反応 性スパッタリング成膜とスパッタリング装置

の研究開発に携わっています.日々,子育てと仕事の両立について悩みながらも一歩ずつをモットーに実験を頑張っています.