

小特集 プラズマと電磁波の相互作用の新規応用—空間的・時間的デザインが拓く新機能—

4. マルチ低インダクタンス内部アンテナを用いた次世代メートル級大面積プロセスに向けたプラズマ生成制御技術

節 原 裕 一

国立大学法人大阪大学 接合科学研究所

(原稿受付：2008年2月4日)

次世代の大面積プロセスでは、大面積の基板にわたって均一かつ高品質のプロセスを高いスループットで実現するためのプラズマ生成制御技術が求められている。本章では、プラズマ生成ならびに制御における問題点について概観し、次世代のメートルサイズを超える大面積プロセスを目指して開発を進めているマルチアンテナ方式のプラズマ生成・制御技術について紹介する。

Keywords:

plasma process, large area, inductively coupled plasma, low-inductance antenna, power deposition profile

4.1 はじめに

プラズマを利用したプロセス技術は、ここ四半世紀に飛躍的な発展を遂げ、今日のエレクトロニクス、薄膜工学をはじめとする製造分野に不可欠な基盤技術の一つとなっている[1]。一方、生産性の向上と低コスト化を実現するため、処理基板サイズの大型化とプロセスの高速化が必須となっており、大面積の基板にわたって均一かつ高品質のプロセスを、高いスループットで実現するためのプラズマ生成制御技術が求められている。

特に、液晶ディスプレイ (LCD) に代表される平面ディスプレイ (FPD) や薄膜太陽電池の製造分野では、市場ニーズに対応したパネル自体の大型化に加えて、1枚のガラス基板 (マザーガラス) で同時に処理を行うパネル数 (面取り数) を増やすことにより低コスト化を図るため、基板サイズはメートルサイズを超える大型化の一途をたどっている[2]。中でも、LCD製造におけるマザーガラスは、現状の最先端製造ラインでも2メートルを超える第8世代 (2200×2600 mm) に入っており、さらに数年の内に第10世代 (2850×3050 mm: 65型パネルを6枚, 57型パネルを8枚, 42型パネルを15枚取ることが可能) へと大型化が加速していくものと予想されている。また、薄膜太陽電池の製造分野では、現状の基板サイズは1m程度 (第5世代) のものが標準的であるが、次世代では基板サイズの更なる大型化と同時に、アモルファスシリコン層と微結晶シリコン層を組み合わせたタンデム型の高効率太陽電池製造に向けて、微結晶シリコン膜を100 nm/min程度の高いスループットで形成するためのプラズマ生成制御技術が喫緊の課題となっている。一方、これらの大型エレクトロニクス製品の軽量化・低コスト化に加えて、電子ペーパーをはじめ

とする新規市場を目指して、ポリマー基板上に高品質の無機材料を大面積かつ高速で形成するためのプロセスとして、大面積の高密度プラズマ技術が注目されている。

プラズマを用いた製造工程では、上述のようにメートルサイズを超える大面積のプラズマ源が不可欠であるが、従来方式のプラズマ源の単なるスケールアップやプロセスの改善のみでは解決が困難な問題 (不均一性制御, プラズマダメージ増大) に直面しており、新しい技術の開発が課題となっている。ここで、従来方式のスケールアップにおける均一性制御に関わる本質的な問題は、後述のように、プラズマ源の大型化に伴って、プラズマ生成に用いられる励起電力分布 (power deposition profile) を均一にすることが困難になることに起因している。

本稿では、大面積かつ高品質なプロセスを高速で実現するためのプラズマ生成ならびに制御における問題点について概観し、次世代のメートルサイズを超える大面積プロセスを目指して筆者らが開発を進めているプラズマ生成・制御技術について紹介する。

4.2 プラズマ源の大型化における問題点

大面積プロセスに適したプラズマ源には、以下の性能が求められる[3]；1) 大面積・均一性と分布制御性 (大型基板処理), 2) プラズマの高密度化 (高スループット), 3) 低プラズマ電位化 (プラズマダメージの抑制, 高品質プロセス), 4) プロセスガス圧の低減 (原料ガスの利用効率向上, 活性種の制御性, ダスト発生の抑制)。これらの内、2)～4)については、プラズマ生成に用いられる放電形式 (容量結合 (CCP) [4-6], 誘導結合 (ICP) [7-9], 表面波励起 (SWP) [10-12]) と放電励起周波数 [13] に大いに依存して

おり、所望のプロセスへの適合性を勘案して放電形式と励起周波数が選択される。

大面積プロセスに向けた多くのプラズマ源開発では、シリコン半導体ウェハプロセス（数十 cm 程度の基板サイズ）を通じて蓄積されてきた放電形式および励起周波数に対する知見と装置技術を基本に据えて、電極やアンテナ等のサイズを大型化することにより、プラズマ源の“スケールアップ”を図るという観点から開発が進められてきたといっても過言ではない。その際、特に問題となるのは大面積プロセスに求められる最も基本的な性能、すなわち上述の項目 1) 大面積・均一性と分布制御性である。

CCP における電極や ICP におけるアンテナなど、プラズマ励起系のサイズのみを大きくすることにより、プラズマ源のサイズをメートルサイズ以上までスケールアップする際に生じる問題は、プラズマ生成に用いる高周波電力の伝搬波長に対して電極やアンテナのサイズが無視できない領域（ $1/4$ 波長以上）に入ることにより起因している[3]。すなわち、プラズマ励起に用いる高周波電力が電極やアンテナ等を伝搬する際に、波としての性質が無視できなくなるため、電力伝送路上で定在波が形成され、励起電力分布、電圧分布あるいは電流分布が不均一となり、プラズマへの電力吸収分布さらにはプラズマ密度に不均一性を生じる根本的な原因となっている。

定在波により不均一性を生じる問題は、高周波誘導結合放電では、直径 30 cm 程度のプラズマ源でも、導体に沿った長さが 2.5 m 程度のスパイラル状のアンテナを用いる場合は、定在波形成のために誘導結合アンテナ上で高周波電流が不均一となり、結果的にプラズマ密度分布ならびにプロセスの面内分布が不均一になることが報告されている[14]。さらに、容量結合プラズマにおいても、放電励起周波数の増加あるいはプラズマ源の大口径化に伴って、高周波電極のサイズが伝搬波長の $1/4$ 程度以上となる領域では、電極上の高周波電圧の分布が定在波の影響により不均一（電極端部の電圧が高くなる）となり、良好なプロセス均一性を確保することが困難になってきている[6, 15, 16]。

一方、大面積での均一性と分布制御性の問題を緩和するため、これまで広く用いられている容量結合型放電を利用したプロセス装置では、プロセス条件（プロセスに使用するガスの分圧比・流量・流れ、リアクタ壁温度など）の工夫によりプロセスの均一性を確保する努力もなされているのが現状である[15]。しかしながら、定在波形成に伴う不均一性をプロセス条件の工夫により補正することには限界があり、かつ上述の 2) プラズマの高密度化（高スループット）と 3) 低プラズマ電位（プラズマダメージの抑制、高品質プロセス）の両立を図ることが困難であることも CCP では問題となっている。

特に、プラズマの高密度化（高スループット化）を図る手段として、励起高周波の周波数を高める方法と電極（CCP）あるいはアンテナ導体（ICP）に供給する高周波電力密度を増大する方法があるが、励起周波数を高めた場合には定在波形成に伴う不均一性の問題がより顕著となり、高周波電力密度を増加した場合には静電結合に伴うプラズ

マ電位変動が同時に増大するため、結果的にプラズマ電位の増大をもたらす[17]、プロセスダメージの増大が避けられなくなる。これらの問題は、FPD における高移動度かつ安定な薄膜トランジスタ（TFT）[17]の製造プロセスあるいはタンデム型薄膜太陽電池[18]の製造プロセスに不可欠となっている微結晶シリコン薄膜の高速製膜と大面積化の両立を阻害する一因であり、次世代の大面積プロセスに求められる重要な課題となっている。

4.3 マルチ低インダクタンスアンテナを用いた大面積プラズマ源の開発

これまでに開発されてきた大面積プラズマ源の多くでは、CCP における高周波電極あるいは ICP におけるアンテナ導体のサイズとして、プラズマ源に匹敵する大きさのものが用いられている。このため、従来の技術では励起電力の分布制御を行う手段として、多点供給による波の重ね合わせ[6, 19]や終端での負荷接続[20]といった受動回路を用いた手法が試みられているが、プロセス中に高周波電力の分布を能動的に制御することは困難であった。

では、上述の定在波の問題を回避して、メートルサイズを超える大面積プラズマ源における均一性を能動的に制御する方策はないのか？さらには、大面積での均一性ならびに分布制御性の確保に加えて、次世代の大面積プロセスの要件であるプラズマの高密度化とダメージ抑制を同時に達成するプラズマ技術は、いかにすれば実現可能であるのか？

これらの問題を解決するため、筆者らが開発している低インダクタンス内部アンテナを用いたマルチアンテナ方式の誘導結合型高周波プラズマ源[21-27]は、従来の発想とは異なる以下の特長を備えている。

まず、得られるプラズマの特性は励起方式に依存するが、高密度プラズマ生成という観点では誘導結合型の放電が有力な候補である。その際、プラズマ源の大面積化にかかわる定在波の問題は、放電を励起するアンテナ導体のサイズに起因していることから、**[a]**アンテナ導体の小型化（低インダクタンス化）、すなわち高周波の伝搬波長よりも十分に短い（波長の $1/4$ よりも十分に短い）代表長を有するアンテナ導体を用いることが重要であり、**図 1**に模式的に示すアンテナ（Low-Inductance Antenna: LIA）を用いている。また、プラズマへの電力吸収効率を高めるため、内部アンテナ方式を採用している。さらに、アンテナ導体が直接プラズマに曝されることにより生じるプラズマ電位の異常な上昇（誘導結合アンテナを接地終端している場合）やアンテナに発生する自己負バイアス（誘導結合アンテナを容量性終端により浮遊電位としている場合）による不純物の発生を防止するため、アンテナ導体（水冷金属パイプ）のプラズマに曝されるすべての面を絶縁体（高抵抗かつ低誘電率の誘電体）で覆っている。また、アンテナに発生する高周波電圧は、この誘電体を介して電圧分割により誘電体前面に形成されるシースに印加されるため、静電結合の抑制にも効果を発揮する。

次いで、大面積にわたる均一性は、**[b]**低インダクタン

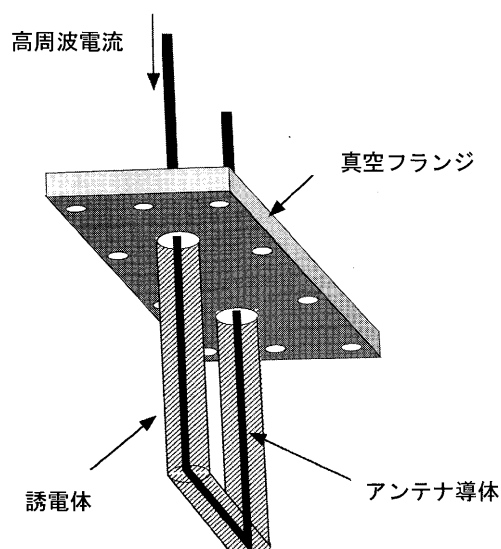


図1 低インダクタンス内部アンテナ (LIA) の模式図。高周波伝搬波長よりも十分短い小型のアンテナ導体を採用し、その周囲を高抵抗かつ低誘電率の誘電体で覆うことにより、プラズマとの絶縁を図る構造となっている。

スの小型アンテナ導体をプラズマ源の所望の箇所に配置するマルチアンテナ方式を採用することにより確保される(図2)。これは、室内の天井や壁面に設置された複数の点光源あるいは線状光源の重ね合わせにより、床面での均一な照度を確保する照明工学での照明設計の考え方に似ており、プラズマ源においては、光源を低インダクタンスアンテナによる局所的なプラズマ励起源に、照度をプラズマパラメータ分布に置き換えて考えることに相当する。但し、プラズマ源の設計においては、拡散過程(荷電粒子:両極性拡散, ラジカル・中性粒子:濃度勾配による粒子拡散)による粒子輸送, 気相での励起種の生成過程そして壁での消滅過程を考慮しなくてはならない点において特別の配慮が必要であり、詳細設計には流体コード等を用いた数値シミュレーションを援用することが望まれる。

さらに、複数のアンテナ導体への高周波電力の給電においては、[c] 個々のアンテナあるいは定在波の問題が生じない近接距離にあるアンテナ群に個別の高周波電源(Amp.)を直結したモジュール構成(図2)にして、複数のモジュールを独立かつプラズマ源全体にわたって統合的に制御する方式を採用することにより、プラズマ源全体での励起電力の分布を能動的に制御することが可能である。また、個々のモジュールに供給される高周波電流, 位相, 周波数の能動的制御も可能であるという特長も備えている。

本方式のプラズマ源が従来のプラズマ源と決定的に異なる点は、定在波による不均一性の問題が根本的に解決され、プラズマ源全体にわたる励起状態の分布(高周波電流, 高周波電圧, 高周波電力)を能動的に制御することにより、プラズマ生成分布の制御性を格段に高めることができる点にある。これらの制御性を従来技術で実現することは、極めて困難であるといえる。

では、このマルチアンテナ方式の誘導結合型プラズマの特性と数値シミュレーションを援用したプラズマ源の設計

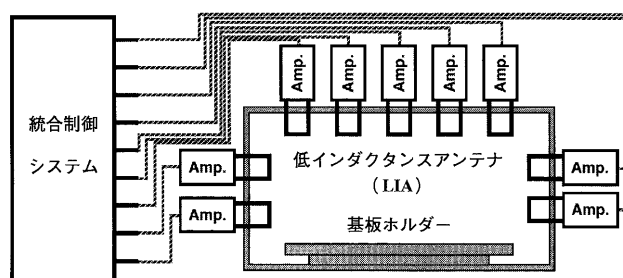


図2 複数の高周波増幅器一体型LIAモジュールを備えた大面積プラズマ源とその統合制御による新方式のプラズマ分布制御システム。

例について紹介する。

まず、プラズマ源の基本的な特性を明らかにするため、直径300–500 mmの円筒型チャンバーの上部フランジに複数の低インダクタンスを配置し、並列接続にてマッチングボックスを介して高周波電源(周波数:13.56 MHz, 最大出力:3 kW)に接続して行ったプラズマ生成実験の結果について述べる。

直径300 mmの円筒型チャンバーにて放電圧力1.1 Paで生成したArプラズマにおけるプラズマ密度の高周波電力依存性を図3に示す[3, 21]。高周波電力の増加に伴ってプラズマ密度は線形に増加し、2.4 kWの高周波電力において、 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ に達する高密度プラズマを生成可能であることがわかった。次いで、プラズマ浮遊電位を計測することにより、誘導結合アンテナの低インダクタンス化がプラズマ電位に与える影響を調べた。その結果、浮遊電位の時間平均値が5 V程度であるのに対し高周波電位揺動は1 V以下に抑制されたプラズマを生成可能であることが明らかとなった[3, 21]。このことは、従来方式での比較的インダクタンスの大きいアンテナを用いた誘導結合プラズマ源では、アンテナに発生する高周波電圧が極めて高いために、高周波成分のpeak-to-peak値は時間平均値と同程度かそれより大きいのが通例であるのに対し、アンテナの低イ

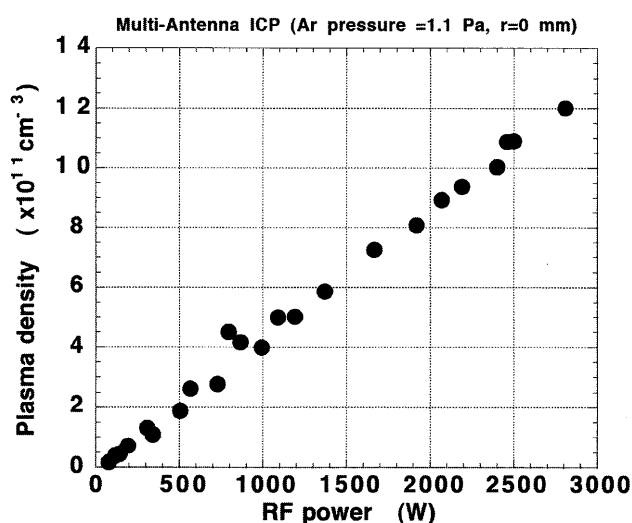


図3 Arプラズマ密度の高周波電力依存性。直径300 mmの円筒型真空容器を用いて、Ar圧力1.1 Paのもとで生成したArプラズマに対する結果を示しており、プラズマ密度は高周波電力に概ね比例して増加することが確かめられている。

ンダクタンス化（低電圧駆動）を図ることにより、高周波導入端に発生する高周波電圧が抑制され、静電結合に伴う高周波電位揺動を効果的に抑制可能であることを示している。

次に、直径 500 mm の円筒型チャンバーの上部フランジに、幅 70 mm で高さ 80 mm の LIA を 4 セット配置し、放電圧力 13 Pa で生成した Ar プラズマにおいて測定した Ar⁺ イオンのエネルギー分布を図 4 に示す。この実験結果は、イオンエネルギーのピークが 4 eV 程度の極めて低いイオンエネルギー分布を実現可能であることを示している。これは、上述のように、アンテナの低インダクタンス化（小型化）により、アンテナに発生する高周波電圧が低減され、静電結合に伴う高周波電位揺動が効果的に抑制されるため、高周波電位揺動に伴うチャンパー壁への電子損失が効果的に抑制されていることが主な要因であると考えている。

さらに、励起高周波電力の増加に対するイオンエネルギー分布の変化について計測したところ、Ar プラズマでは高周波電力の増加に対してイオンエネルギー分布が僅かながら低エネルギー側にシフトする傾向にあり[26]、水素プラズマでは 25 eV 程度から 12 eV 程度へと顕著に低エネルギー側にシフトする傾向を示すことが明らかになっている。この高周波電力増加に伴うイオンエネルギー分布の挙動は、以下のように理解される。すなわち、アンテナに発生する高周波電圧は、アンテナ導体の周囲に設けた誘電体を介して電圧分割により誘電体前面に形成されるシースに静電的に印加され、プラズマの高周波電位揺動をもたらすが、高周波電力の増加によるプラズマ密度上昇に伴ってシースのインピーダンスが減少する。ここで、プラズマ密度は高周波電力に対して線形に増大（シースのインピーダンスはその逆数に比例）するのに対し、アンテナに発生す

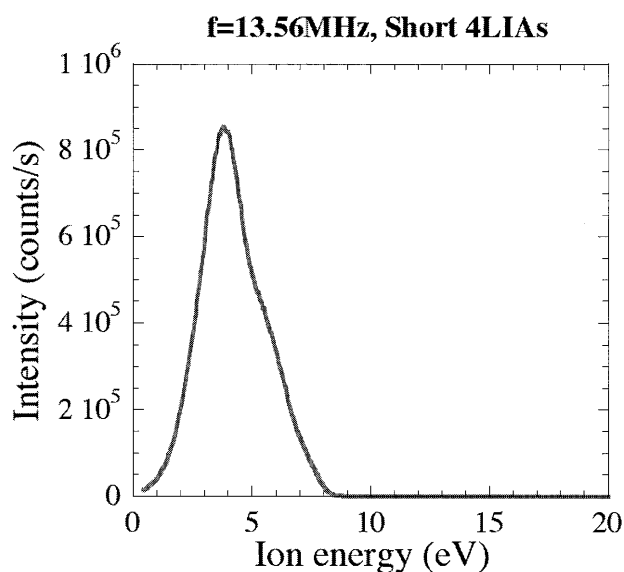


図 4 Ar⁺イオンエネルギー分布関数(IEDF). 直径 500 mm の円筒型真空容器を用いて、Ar 圧力 13 Pa のもとで 1 kW の高周波電力を供給することにより生成した Ar プラズマに対する結果を示しており、高密度領域においても低エネルギーかつ狭いイオンエネルギー分布が得られている。

る高周波電圧は高周波電力の 1/2 乗で増加するため、結果的にシースでの静電結合に伴うプラズマの高周波電位揺動が低減されることが主な要因であると考えている。

以上の LIA を用いたプラズマ生成における基礎特性は、製膜をはじめとするドライプロセスでのダメージ低減における重要なファクターであり、高密度プラズマ生成による製膜速度の向上と高品質製膜プロセスの両立をはかるうえで極めて効果的なプラズマ生成法であることを示している。実際に、このプラズマ生成方式を用いて、0.7 Pa 程度の低圧の水素希釈したシラン混合ガス中で生成したプラズマにより 300℃ のガラス基板上で製膜したシリコン薄膜では、ラマン分光による分析の結果、結晶質相が占める割合（結晶化率）が 90 % 程度以上に及ぶ高品質の微結晶シリコン膜を、80 nm/min 以上の高速で形成することが可能であることを明らかにしている[17]。

続いて、複数の LIA アンテナを装着したメートルサイズの直方体チャンパー（面内サイズ 910 mm×780 mm、高さ 370 mm）を用いて、分布制御性について調べた実験結果を紹介する[22]。この実験では、図 5 および図 6 に示すように、幅 100 mm で高さ 100 mm の LIA アンテナの各々に独立の高周波電源を接続した LIA モジュールを天板に 6 セット（LIA-1～LIA-6）配置し、統合制御システムにより各々のモジュールに供給する高周波電力を独立に制御した。このプラズマ源を用いて、ガス圧 1.3 Pa で生成したメタンプラズマを用いて製膜した水素化アモルファス炭素膜の膜厚分布を図 7 に示す。すべての LIA モジュールに等しく 400 W の高周波電力を供給して製膜した場合、図 7 (a) に示すように、チャンパー面内の中心付近の膜厚が最も高くなっている。これは、高周波励起電力が均一に供給されているのに対し、チャンパー側壁でのプラズマ損失のために、プラズマ密度の面内分布が中心で高くなる傾向にあることを示している。ここで、側壁でのプラズマ損失に伴うプラズマ密度分布の不均一性を改善する方策として、天板での高周波電力供給分布を若干ホロー型に近づける方法が考えられる。そこで、この実験配置では中央に設置した 2 台のモ

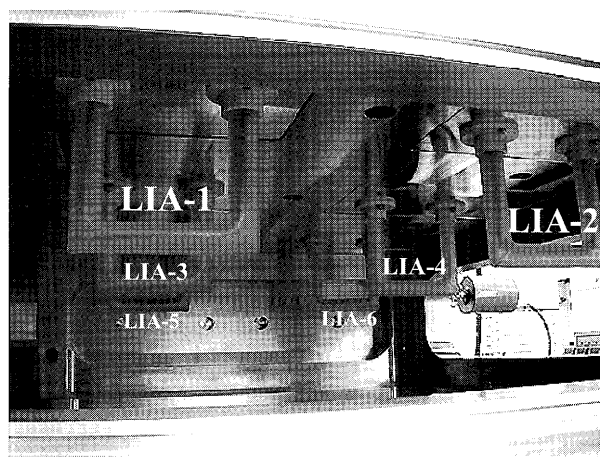


図 5 天板に 6 台の LIA モジュールを装着した直方体プラズマ生成容器（面内サイズ 910 mm×780 mm、高さ 370 mm）の内部。

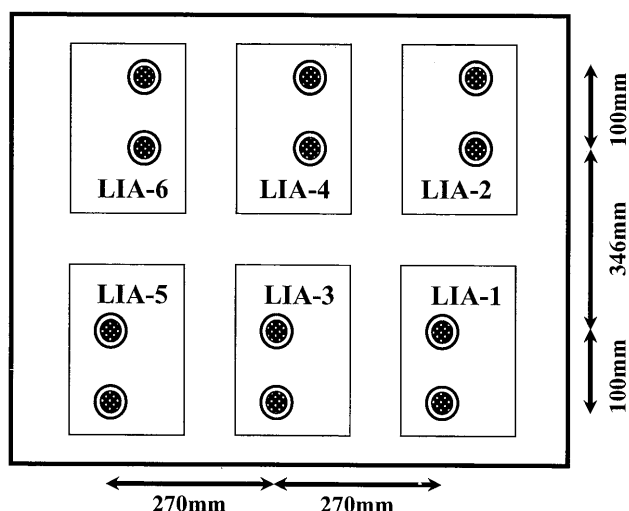


図6 天板に装着した6台のLIAモジュールの配置を示す模式図。

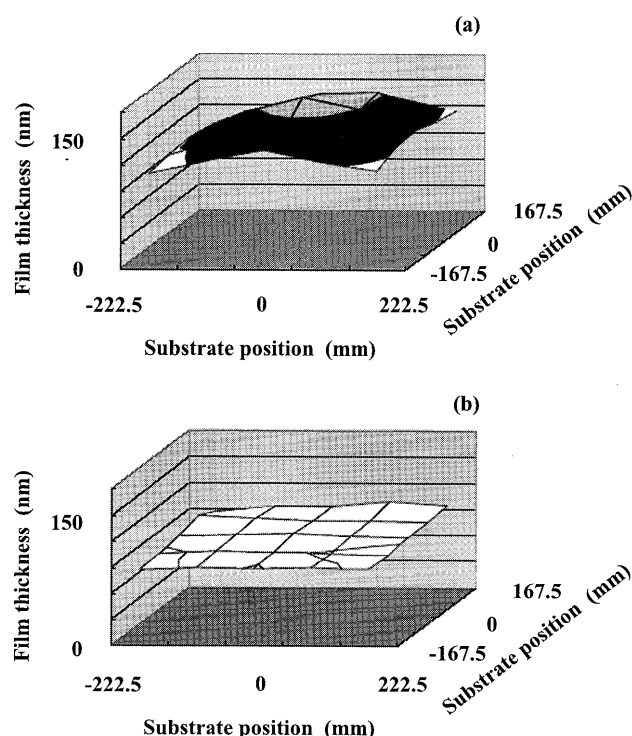


図7 直方体チャンバー(図5および図6)で生成したメタンプラズマ(1.3 Pa)を用いて製膜した水素化アモルファス炭素膜の膜厚分布。(a)図6に示す6台のLIAモジュールに均等高周波電力(LIA-1~LIA-6の各々に1モジュールあたり400 W)を供給して製膜した結果、(b)図6に示す6台のLIAモジュールに不均一な高周波電力(LIA-1, 2, 5, 6の各々に1モジュールあたり400 W; LIA-3, 4には1モジュールあたり50 W)を供給して製膜した結果を示す。

ジュール(LIA-3とLIA-4)に供給する高周波電力のみを低減して製膜を行ったところ、図7(b)に示すように、膜厚分布の不均一性が著しく改善されることが確かめられた。

これらの結果は、本方式のプラズマ源が従来のものと異なり、プラズマ源全体にわたる励起状態の分布(高周波電流、高周波電圧、高周波電力)を能動的に制御することにより、プロセスの分布制御性を格段に高めることが可能であることを示している。さらに、これらの制御性を従来技術で実現することは、極めて困難であるといえる。

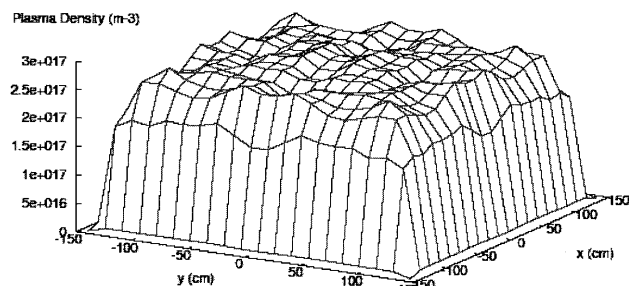


図8 数値シミュレーションによる装置設計の一例。直方体チャンバー(面内サイズ3000 mm×3000 mm、高さ400 mm)を用いて、圧力20 mTorrで生成するArプラズマの基板近傍でのプラズマ密度分布。

最後に、一辺の長さが3000 mmで高さ400 mmの直方体チャンバーでの流体シミュレーションによる設計事例を図8に示す。高さ160 mm、幅400 mmのLIAを天板に複数配置して圧力20 mTorrのアルゴン中で生成するプラズマの基板近傍でのプラズマ密度分布を示しており、peak-to-valleyの面内均一性が6.5%の範囲として2260 mm×2260 mmのプロセス領域を確保することが可能であることを示している。

4.4 まとめ

本稿では、次世代のメートル級の大面積プロセスを念頭に、プラズマ源に要求されている基本性能とプラズマ源のスケールアップにおける問題点について概観した。多くの開発事例では励起電力の分布制御を行う手段として受動回路を用いた手法が用いられ、定在波形成を前提に不均一性の改善を図る観点で研究開発が進められ、プロセス中におけるプラズマ分布の能動的な分布制御にまで至っていないのが現状といえる。さらに本稿では、筆者等が開発を行っている低インダクタンスアンテナを用いたマルチアンテナ方式の誘導結合プラズマ源について、プラズマの基本的な特性ならびに分布制御に関する事例とともに、一辺3メートルの直方体プロセスチャンバーでの設計事例を紹介した。このプラズマ生成技術では、個々の低インダクタンスアンテナを独立かつ統合的に制御することにより、良好な均一性と制御性を有するプラズマ源となる可能性を秘めているが、今後、本技術の多方面での実用化を目指して、技術開発をさらに展開していく予定である。

謝辞

本稿で紹介した低インダクタンスアンテナを用いた大面積プラズマ生成に関する研究は株式会社イー・エム・ディーとの共同研究の成果であり、シミュレーションコードは京都大学の斧高一先生のご指導を得て開発したものであり、ここに深く感謝申し上げます。さらに、本稿で紹介した研究開発の一部は、科学技術振興機構、大阪大学グローバルCOE「構造・機能先進材料デザイン教育研究拠点」、金属ガラス・無機材料接合技術開発拠点の支援を受けて実施したものであり、深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (Wiley, New York, 1994).
- [2] 北原洋明：'04 最新液晶プロセス技術（プレスジャーナル，2004） p. 23.
- [3] 節原裕一：プラズマ・核融合学会誌 **81**, 85 (2005).
- [4] A.A. Howling, J.L. Dorier, C. Hollenstein and U. Kroll, J. Vac. Sci. Technol. A **10**, 1080 (1992).
- [5] H.H. Goto, H.D. Lowe and T. Ohmi, J. Vac. Sci. Technol. A **10**, 3048 (1992).
- [6] L. Sansonnens, A. Pletzer, D. Magni, A.A. Howling, C. Hollenstein and J.P.M. Schmitt, Plasma Sources Sci. Technol. **6**, 170 (1997).
- [7] J. Hopwood, Plasma Sources Sci. Technol. **1**, 109 (1992).
- [8] P.L.G. Ventzek, R.J. Hoekstra and M.J. Kushner, J. Vac. Sci. Technol. **12**, 461 (1994).
- [9] J.T. Gudmundsson and M.A. Lieberman, Plasma Sources Sci. Technol. **7**, 1 (1998).
- [10] M. Moisan, C. Baudry and P. Leprince, IEEE Trans. Plasma Sci. PS-3, 1004 (1975).
- [11] K. Komachi and S. Kobayashi, J. Microwave Power Electromagn. Energy **24**, 140 (1989).
- [12] M. Nagatsu, G. Xu, M. Yamage, M. Kanoh and H. Sugai, Jpn. J. Appl. Phys. **35**, L341 (1996).
- [13] 菅井秀郎：応用物理 **70**, 398 (2001).
- [14] M.H. Khater and L.J. Overzet, Plasma Sources Sci. Technol. **9**, 545 (2000).
- [15] J. Perrin, J. Schmitt, C. Hollenstein, A. Howling and L. Sansonnens, Plasma Phys. Control. Fusion **42**, B353 (2000).
- [16] J.P.M. Schmitt, Thin Solid Films **174**, 193 (1989).
- [17] E. Takahashi, Y. Nishigami, A. Tomyo, M. Fujiwara, H. Kaki, K. Kubota, T. Hayashi, K. Ogata, A. Ebe and Y. Setsuhara, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, 1280 (2007).
- [18] J. Meier, P. Torres, R. Plate, S. Dubail, U. Kroll, J.A. Anna Selvan, N. Pellaton Vaucher, Ch. Hof, D. Fischer, H. Kappner, A. Shah and K.D. Ufert, Solar Energy Mater. Solar Cells **49**, 35 (1997).
- [19] Y. Takeuchi, M. Murata, S. Uchino and Y. Kawai, Jpn. J. Appl. Phys. **40**, 3405 (2001).
- [20] M. Kushner, W. Collison, M. Grapperhaus, J. Holland and M. Barnes, J. Appl. Phys. **80**, 1337 (1996).
- [21] Y. Setsuhara, T. Shoji, A. Ebe, S. Baba, N. Yamamoto, K. Takahashi, K. Ono and S. Miyake, Surf. Coatings. Technol. **174-175**, 33 (2003).
- [22] Y. Setsuhara, K. Takenaka, A. Ebe and K. Nishisaka, Plasma Process. Polym. **4**, S628 (2007).
- [23] Y. Setsuhara, K. Takenaka, A. Ebe and K. Nishizaka, Solid State Phenomena **127**, 239 (2007).
- [24] H. Deguchi, H. Yoneda, K. Kato, K. Kubota, T. Hayashi, K. Ogata, A. Ebe, K. Takenaka and Y. Setsuhara, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, 8042 (2006).
- [25] K. Takenaka, Y. Setsuhara, K. Nishisaka and A. Ebe, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, 8046 (2006).
- [26] K. Takenaka, Y. Setsuhara, K. Nishisaka and A. Ebe, Plasma Process. Polym. **4**, S1009 (2007).
- [27] K. Takenaka, T. Sera, A. Ebe and Y. Setsuhara, Plasma Process. Polym. **4**, S1013 (2007).