



解説

次世代メートルサイズ大面積プロセス用プラズマ源

節原 裕一

(大阪大学接合科学研究所)

Meter-Scale Large-Area Plasma Sources for Next-Generation Processes

SETSUHARA Yuichi

Joining and Welding Research Institute, Osaka University, Ibaraki 567-0047, Japan

(Received 18 October 2004)

Development of large-area high-density plasma sources with a scale length of meters is strongly desired for a variety of plasma processes, especially the flat panel display fabrications. Considering design issues for plasma production with high-frequency power sources to satisfy the requirements for enlargement of source-size exceeding a meter, the power deposition profile and hence the plasma distribution become inherently non-uniform, largely due to standing wave effects, which cannot be avoided with increasing source size when the source employs power-coupling devices (inductive antennas or capacitive electrodes) with a scale-length equivalent to or as long as the $1/4$ wavelength of the HF-power transmission. In this article, these constraints associated with large-area sources are reviewed, and an inductively coupled RF plasma source with multiple low-inductance antenna (LIA) units is presented as a promising candidate to avoid the problems with conventional sources.

Keywords:

large-area plasma, plasma processing, standing-wave effect, power deposition profile, inductive coupling, internal antenna

1. まえがき

プラズマを利用したプロセス技術は、産業部材の表面改質から半導体デバイス製造ならびに平面ディスプレイ製造にわたる幅広い分野において、産業を支える基盤技術として発展してきた[1,2]。さらに、生産性の向上と低コスト化を実現するため、処理基板サイズは大型化の一途をたどっており、大面積の基板の全面にわたって均一かつ高品質のプロセスを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)をはじめとする平面ディスプレイ(FPD)の製造分野では、市場ニーズに対応したディスプレイパネル自体の大画面化に加えて、Fig.1に示すように、1枚のガラス基板(マザーガラス)で同時に処理を行うディスプレイパネルの数(面取り数)を増やすことにより低コスト化をはかることが必須となっており、マザーガラス基板のサイズはメートルサイズ以上の大面積へと拡大している[3]。

しかしながら、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、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目下焦燥の課題となっている。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

author's e-mail: setsuhara@jwri.osaka-u.ac.jp

ことが困難になることに起因している。すなわち、周波数が10 MHz以上の高周波電力を用いたプラズマ生成の場合、プラズマ源の大型化に伴って、容量結合での高周波電極あるいは誘導結合に用いられるアンテナ導体の長さが、高周波電力の伝搬波長に対して無視できない程度となり(結果的に、高周波電力が波として電極上を伝搬する状態が無視できなくなり)、電極あるいはアンテナ導体上での定在波形成のために電圧あるいは電流分布の不均一性が顕在化することが本質的な要因である。また、VHF帯の電磁波あるいはマイクロ波を用いたプラズマ源においては、波長がさらに短いことに加えて、表面波を利用したプラズマ生成では表面波共鳴の付近になると波長が極端に短くなることも考慮しなくてはならない[4]。

本稿では、特に平面ディスプレイ製造をはじめとする分野を念頭に、次世代の大面積プロセスを目指して開発が進められているプラズマ源について、メートルサイズ以上の大面積かつ均一なプロセスを実現するためのプラズマ生成・制御における問題点と開発の現状について解説する。

2. プラズマ源のスケールアップにおける問題点

大型基板プロセスに適したプラズマ源には、主として以下の性能が求められる; 1) 大面積・均一性と分布制御性(大型基板処理), 2) 高密度プラズマ(高スルーPUT), 3) 低プラズマ電位(プラズマダメージの抑制, 高品質

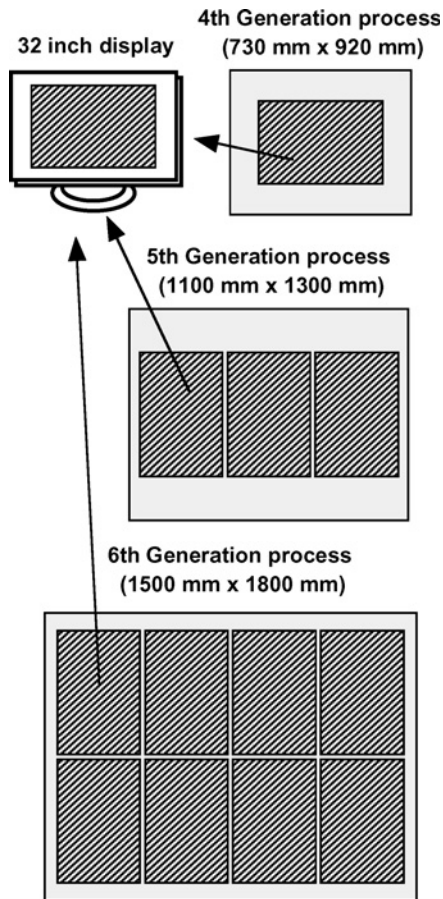


Fig. 1 Number of displays taken from a mother sheet.

質プロセス), 4) 低ガス圧でのプロセス(原料ガスの利用効率向上, 活性種の制御, ダスト発生の抑制). これらの内, 2) ~ 4) の項目については, プラズマ生成に用いられる放電形式(容量結合[1, 2, 5-17], 誘導結合[1, 2, 18-32], 表面波励起[1, 33-44])と励起周波数[4]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.

このため, 大面積プロセスに向けた多くのプラズマ源開発では, 数 10 cm 程度の比較的小型サイズでの研究開発の過程で蓄積されてきた放電形式ならびに励起周波数に対する知見と既存の装置技術を基本にしてプラズマ源を構成し, 従来のプラズマ源の“スケールアップ”(電極やアンテナ等のサイズを大きくする)を図るといった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.

一方, プラズマ生成におけるこういった問題を緩和するため, 特に生産装置レベルでは, 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[45]. しかしながら, プラズマ生成における不均一性を, 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, かつメートルサイズを超えるプロセス装置においてはプロトタイプの試作でもかなり高価と

なっていることから, 良好な均一性と分布制御性を有するプラズマ源の開発とともに, プロセスシミュレーション技術[46]や大面積プラズマ生成に関する設計ツール(解析モデル, 数値シミュレーション)の確立が重要な課題となっている.

そこで, 電極やアンテナ等の励起電力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について考えてみよう.

各種のプロセスに適した高密度プラズマ源では, 高周波あるいはマイクロ波帯の電磁波(10 MHz~数 GHz)がプラズマ生成の励起源として用いられている. ここで, 周波数が 10 MHz~数 GHz の電磁波は, 自由空間波長は 0.1 m~10

マザーガラス基板サイズが大型化している事情を, LCD の場合を例に概観してみよう. まず, ディスプレーパネル自体のサイズでは, パーソナルコンピュータのモニター向けの用途では, 1990年代初頭にノート型に対応した対角長10インチから, 現状では17インチへと拡大し, 大きいものでは19~21インチの高精細パネルが製造されるに至っている. また, 液晶テレビ用パネルでは, 現状で30~37インチ, そして40~50インチの試作から60インチまでを視野に入れた開発競争が続いている. 次いで, 1枚のマザーガラス基板で一括処理を行うパネル数では, 一般に生産性が良い(採算がとれる)とされるのは6面取り以上といわれており, 上述のパネル自体の大画面化と併せて, マザーガラス基板の大型化が要求されている理由となっている. 今後, 開発が進む52インチや60インチの大画面パネルの製造で要求されるマザーガラス基板のサイズは, 図に示すように, それらのパネルが6面取りできるサイズとなる第8世代(マザーガラス基板サイズ: 2,200×2,600 mm), さらには第9世代(マザーガラス基板サイズ: 2,600×3,100 mm)へと大型化が加速していくものと予想されている[3].

Generation-8	2200x2600 mm
Generation-7	1800x2100 mm
Generation-6	1500x1800 mm
Generation-5	1100x1300 mm
Generation-4	730x920 mm
Generation-3	650x830 mm
Generation-2	400x500 mm
Generation-1	320x400 mm

Trends of substrate size for FPD (LCD) process.

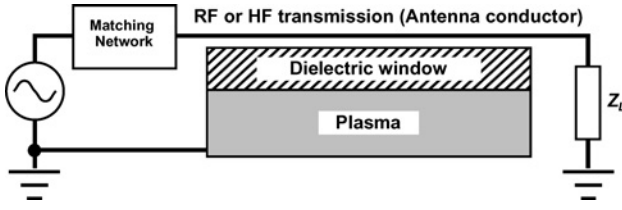


Fig. 2 Schematic diagram of inductively coupled RF plasma generation.

mのオーダーであるが、プラズマ生成系における電力伝送路(容量結合での高周波電極、誘導結合でのアンテナ導体、マイクロ波導波路)での実際の伝播波長は、プラズマ生成系に用いられている誘電体やプラズマとの結合のために、自由空間波長よりも短くなる(周波数 10 MHz 程度の電磁波の場合でも、後述のように、実際の伝播波長は自由空間波長の半分程度となる)。また、表面波を利用したプラズマ生成では、表面波共鳴の付近での波長はさらに極端に短くなる。

すなわち、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直面する状況は、プラズマ生成系における電力伝送路の特性長が伝播波長に対して無視できない領域に入ることを意味している。このため、励起電力が電力伝送路上を波動として伝搬する状態が無視できなくなり、電力伝送路上での定在波形成のために、励起電力分布、電圧分布あるいは電流分布の不均一性が顕在化するという問題を生じることになる。

こういった状況を高周波誘導結合プラズマを例に、もう少し詳しくみてみよう。誘導結合プラズマの生成系の模式図を Fig. 2 に示す。励起電力源から供給される高周波電力は、インピーダンス整合回路を介して、プラズマ生成系に設けられたアンテナ導体(誘導結合)に給電され、アンテナ導体を流れる高周波電流によってアンテナ周囲に高周波磁界を生じ、この磁界の時間変化が誘起する誘導電界(ファラデーの電磁誘導の法則)により気相中の電子が加速され、中性粒子やイオンとの衝突を経て高周波放電が生成される[1]。このため、上述のように、アンテナ導体上を伝播する高周波電力の波長がアンテナ長に対して無視できない程度の長さになると、アンテナ導体は集中定数の回路素子ではなく、分布定数回路として振る舞う。ここで、集中定数回路(lumped constant circuit)とは、一般に波長に比べて回路素子の物理的大きさが十分に小さい場合において、インダクタ、キャパシタ、抵抗を独立した回路素子として取り扱うことができる回路である。一方、伝搬する信号の波長に比べて回路素子の物理的大きさが無視できない程度の大きさになる場合には、伝送線路の回路定数を集中定数で表すことができなくなるために分布定数として表し、電圧および電流の振る舞いを時間と位置の関数として取り扱わなくてはならなくなる。このように分布定数として表される回路を分布定数回路(distributed constant circuit)という。これらの回路の取り扱いと振る舞いについては、参考文献[47]などを参照されたい。

高周波誘導結合プラズマ生成系における高周波伝播の等

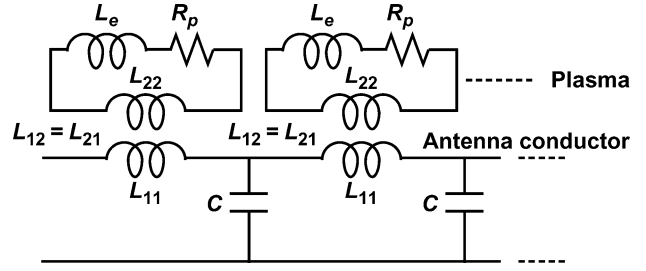


Fig. 3 Equivalent circuit of the transmission line for antenna-plasma coupling [48]. The parameters L_{12} , L_{22} , L_e and R_p are dependent on the plasma properties (plasma density, electron temperature and discharge geometries).

価回路の一例として、Lieberman らによるモデル[48]を Fig. 3 に示す。アンテナを伝播する高周波は、アンテナ導体自体のインダクタンス(単位長さあたり L_{11})、対地容量(単位長さあたり C)のほか、プラズマへの誘導結合のために、自由空間よりも短い波長となる。ここで、 L_{22} は放電の電流路に伴う単位長さあたりのインダクタンス、 L_{12} と L_{21} はプラズマ中での誘導電界による電子加速に伴う L_{11} と L_{22} の間の単位長さあたりの相互インダクタンス($L_{12} = L_{21}$)、 L_e は加速された電子の慣性に伴う単位長さあたりのインダクタンス、そして R_p は加速された電子からプラズマへの電力吸収を単位長さあたりの抵抗として表している(より厳密には、線路自体の電力損失を表す抵抗とともに、プラズマへの容量結合も考慮する必要がある)。これらの回路パラメータから、プラズマとの結合部における単位長さあたりのインピーダンス Z_s は、プラズマとの結合部における高周波電圧および高周波電流を V_{rf} および I_{rf} 、高周波電力の角周波数を ω として、

$$Z_s = V_{rf}/I_{rf} = j\omega L_{11} + \frac{\omega^2 L_{12}^2}{R_p + j\omega(L_{22} + L_e)} \equiv R_s + j\omega L_s \quad (1)$$

と表され、 L_{12} 、 L_{22} 、 L_e ならびに R_p はプラズマの特性(誘導結合の形式、プラズマ密度、電子温度)に依存している。さらに、対地容量 C を加味することにより、アンテナ系の線路上を伝搬する高周波の特性インピーダンス Z_0 および伝搬定数 γ は、

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_s + j\omega L_s}{j\omega C}} \quad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{j\omega C(R_s + j\omega L_s)} \equiv \alpha + j\beta \quad (3)$$

と表され[48]、線路を伝搬する高周波の波長 λ は、

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (4)$$

と求められる。

典型的な例として、プラズマ密度 10^{11} cm^{-3} 、電子温度 3 eV のプラズマが、周波数 13.56 MHz の高周波電力を用いて生成されている場合を考える。周波数 13.56 MHz の高周波の自由空間での伝播波長は 22 m であるが、アンテナ導体を伝播する高周波の波長は 13 m 程度であることが上記の

モデルで見積もられ[48], 自由空間における値の半分程度となることがわかる。

さらに, アンテナ導体の終端は, 通常の誘導結合プラズマ生成では電源のアースに接続($Z_L = 0$)されており, 高周波が伝播するアンテナ導体の特性インピーダンス Z_0 は有限の値をもっているため, 終端では反射波が生じる。このため, アンテナ導体の長さが伝播波長の $1/4$ 程度以上となると, 波動としての性質である定在波(進行波と反射波により形成)の影響が顕在化する。

したがって, アンテナ導体の特性長が自由空間波長の $1/10$ 程度以上となる領域(周波数 13.56 MHz では 2 m 程度以上)では, 定在波の影響が顕著となり, アンテナ導体の長さ方向における高周波電流分布は不均一となってしまふ。結局のところ, 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は, この定在波のために, プラズマを生成する誘導電界強度はアンテナ導体の長さ方向に不均一な分布を生じることになり, プラズマへの電力吸収分布さらにはプラズマ密度の不均一性を生じる根本的な原因となっている。この定在波の影響によりプラズマ生成が不均一となる問題は, メートルサイズのプラズマ源だけでなく直径 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[49-52]。

上記の例で述べた定在波形成による問題は, 容量結合プラズマにおいても報告されており, 放電励起周波数の増加あるいはプラズマ源の大口徑化に伴って, 高周波電極の特性長が伝播波長の $1/4$ 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[14, 45, 53]。また, 直径 1 m の平行平板を用いた容量結合プラズマ生成における高周波伝播に関して, Lieberman が行った電磁界モデルによる解析では, 電極上での径方向の伝播波長は自由空間波長の半分程度であり, 周波数 13.56 MHz では定在波の影響が無視できるのに対し, 周波数 40.7 MHz では定在波による容量結合への影響が顕著になることが示されている[54]。この解析結果は, 周波数が 13.56 MHz であっても, 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は, 上述の誘導結合プラズマ生成の場合と同様に, 定在波による電圧分布の不均一性が問題となることを示唆している。

一方, マイクロ波領域の電磁波を用いる表面波プラズマ生成では, 自由空間波長そのものが 10 cm 程度であり, メートルサイズでの伝送を考えると導波路における定在波の形成により十分多数の山と節を持つことになり, プラズマ源全体としてみれば良好な均一性を確保できることになる。このため, 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は, 定在波形成による問題よりも, 励起電力の伝送路上での分布が, プラズマへの電力吸収に伴って減衰することによって不均一性を生じること

の方が問題となる[44]。

3. 大面積プロセス用プラズマ源の開発動向

プラズマ生成に用いる高周波の波長に比べて十分小さい電極あるいは伝送路を用いた従来の小型のプラズマ源(10 cm 程度)では, 励起電力の波としての性質に起因する問題を考慮することはあまり重要ではなかった。一方, 前節で述べたように, プラズマを生成する励起電力の伝送路の長さが伝播波長の $1/4$ 程度以上となるために形成される定在波, あるいはプラズマへの吸収のために生じる伝送路上での電力減衰に起因する不均一性は, プラズマ源の大きさをメートルサイズ以上までスケールアップする際における本質的かつ原理的な問題である。それゆえ, メートルサイズを超えるプラズマ源では, いずれの放電形式においても電力分布の制御をいかに行うかが鍵であるといえる。また, 前節では触れなかったが, 特に誘導結合プラズマならびに表面波プラズマにおいては, プラズマとの間に誘電体を介して励起電力の伝送路が配置されるが, この誘電体が真空隔壁を兼ねる場合は, メートルサイズを超えるプラズマ源へのスケールアップでは必然的に大気圧に対して十分な強度を有する程度まで厚くすることが必要となり, 励起電力のプラズマへの結合効率が悪い構造となる。このため, アンテナ系の構造として, アンテナ導体ならびに励起電力の伝送路を真空中に配置した構造(内部アンテナ)を採用することも重要となる。本節では, 容量結合(平行平板型)プラズマ源ならびに誘導結合プラズマ源について, これらの問題を解決するための技術的な工夫について紹介する。

ここで, 高周波プラズマにおける定在波形成の問題自体は, 周波数の低い励起電力を使用することによりプラズマ分布の均一性を改善することが可能であると考えられる。しかしながら, 低周波数化することによってプラズマ密度が顕著に低下してしまうことに加えて[49], 電子温度も高くなることから[55], 前節の冒頭に述べた2)スルーットならびに3)プラズマダメージ[56]において新たな問題を生じることになる。このため, 容量結合プラズマ生成ならびに誘導結合プラズマ生成では, 概ね 10 MHz 以上の高周波電力が採用されている。

まず, 容量結合を用いたプラズマ生成では, 上述のようにプラズマ密度の向上と低電子温度化(低ポテンシャル化)を促進するため, 放電励起周波数を上げることが求められている。その際, 前節でも述べたように, 特性長が 1 m 程度の高周波電極を用いたプラズマ源では, 40 MHz 程度の周波数でも定在波の形成が避けられない。このため, 高周波電極への高周波電力の給電点を複数設けることにより, 異なる分布を有する定在波を形成して, それらを重ね合わせるにより均一性を改善する技術が試みられている[14, 57-60]。しかしながら, これらはいずれも高周波電極上での定在波形成を前提にしている(定在波の形成を根本的に解消することは念頭においていない)ため, 重ね合わせによる不均一性の改善に効果はあるものの, 周波数の増加に伴って電極上での電圧分布ならびにプロセス面内分布の不均一性が顕著となる問題も報告されている[14]。

次いで、誘導結合を用いたプラズマ生成では、高周波電源に並列に接続された複数のスパイラルアンテナの終端に、容量性負荷あるいは誘導性負荷（コイル）を接続することにより不均一性の改善が試みられている。アンテナ導体の終端に容量性負荷を接続した場合は、不均一な分布形状をアンテナ導体上で移動させる効果を示すものの、不均一性自体の低減には至っていない[51]。一方、誘導性負荷を接続した場合は、アンテナ導体に沿った方向の不均一性は改善されるものの、並列接続されている複数のアンテナ導体に流れる高周波電流をいかにして揃えるかが課題として残っている[61]。また、アンテナ導体線路の終端に無誘導の抵抗性負荷を接続することによって終端での反射を抑制する試みについても紹介されているが、高周波電流が流れる方向の不均一性については改善されるものの、抵抗性負荷での電力損失のためにプラズマへの高周波電力の結合効率が顕著に低下することが問題として指摘されている[49]。さらに、Liebermanら[62]は、真空容器内に設けた複数の直線導体を直列に接続したアンテナを用いてプラズマ源を構成し、定在波自体の形成を避けるため、高周波電源からアンテナ導体への整合回路を工夫することにより、アンテナ導体に進行波として高周波電力を供給する技術を提案している。しかしながら、整合器からの出力自体は進行波と見なせる形で高周波電力が供給されている場合でも、アンテナ導体としてプラズマ源の寸法と同程度の直線導体がいわれている点とアンテナの配置に制約を伴うために、プラズマ生成条件によってはプラズマ密度分布の均一性に課題を残している。

4. メートルサイズ大面積プラズマ源の設計例

これまでに開発されてきた大面積プラズマ源では、上述のように、容量結合プラズマ生成における高周波電極あるいは誘導結合プラズマ生成におけるアンテナ導体の特性長として、プラズマ源に匹敵する大きさのものが用いられている。それゆえ、高周波電極あるいはアンテナ導体における定在波の形成のために、プラズマに投入される高周波電力分布が不均一となる問題自体は解決されてはいない。また、これまでに開発されてきた技術では、励起電力の分布制御を行う手段として、多点供給による重ね合わせ、並列分岐、負荷接続といった受動回路を用いた手法が採用されており、プロセス中に高周波電力等の分布を能動的に制御することは困難であった。

このため、筆者らは[a]誘導結合アンテナ自体を低インダクタンス化して集中定数として扱えるようにし (Fig. 4), [b]それを複数用いてプラズマ源を構成するマルチアンテナ方式のプラズマ生成を行い[63], かつ[c]個々の低インダクタンス内部アンテナに個別の高周波増幅器を直結して増幅器一体型モジュール (Fig. 5(a)) を構成し、個々のモジュールを独立かつ統合的に制御する新しい概念に基づく大面積プラズマ源 (Fig. 5(b)) の開発を行っている。本方式では、個々のモジュールをプラズマ生成室の所望の箇所に複数個装着したマルチアンテナ方式により、高密度かつメートルサイズ以上の超大面積プロセス用プラズマを生成

することができる。さらに、各モジュールの駆動電力を独立かつ統合的に制御することにより、従来のプラズマ源で解決が困難であった定在波形成の問題を生じることなく、高周波電力分布とともにプラズマ密度分布を能動的に制御することが原理的に可能である。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。

本節では、このマルチアンテナ方式の誘導結合プラズマ生成によるメートルサイズ大面積プラズマ源の特性と数値

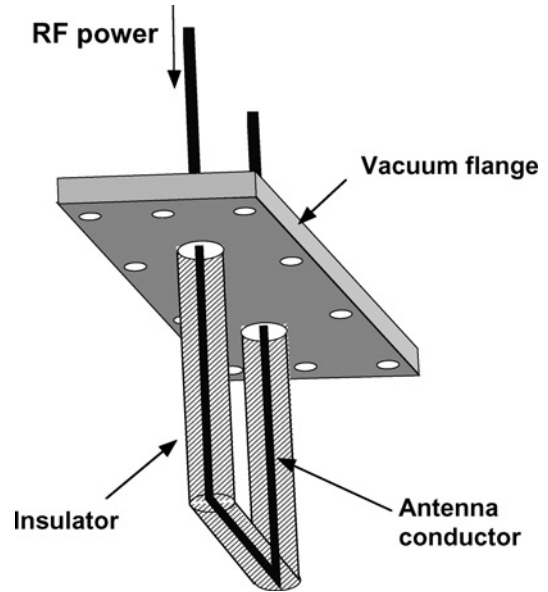


Fig. 4 Schematic illustration of low-inductance antenna (LIA) unit. The LIA unit consists of a U-shaped antenna conductor, which is fully covered with insulator for the dielectric isolation from the plasma.

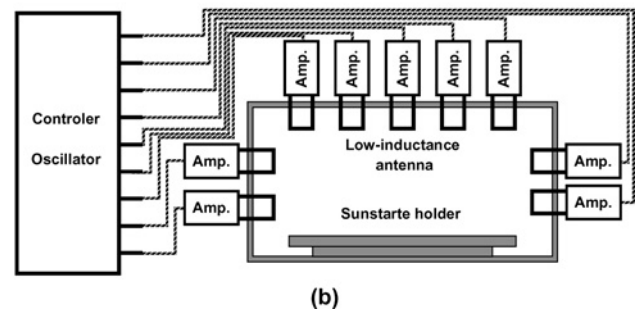
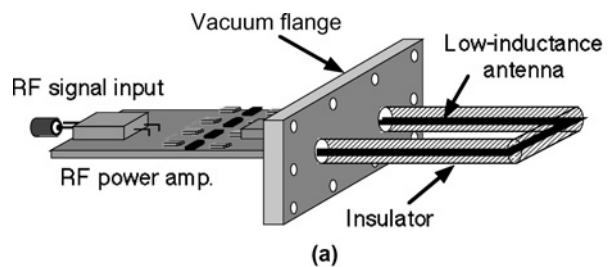


Fig. 5 Schematic illustration of (a) low-inductance antenna (LIA) unit equipped with RF power amplifier and (b) large-area plasma source installed with multiple LIA units which are independently and actively controlled by the integrated control module.

シミュレーションを援用したプラズマ源の設計例について紹介する。まず、プラズマ源の基本的特性を明らかにするためにに行った実験について、プラズマ発生装置の概略を Fig. 6 に示す。このプラズマ源は、直径 300 mm の円筒型チャンバーの上部フランジに、Fig. 4 に模式的に示した低インダクタンスアンテナ (LIA) を 4 セット配置し、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) に接続され、終端は接地している。アンテナ導体には、銅パイプ (水冷) を用い、プラズマに曝される全ての面を絶縁体で覆っている。シングルプローブを導入して、チャンバー中心部 (アンテナから下流側 100 mm, 軸上の位置) でのプラズマパラメータを計測した。ターボ分子ポンプにてチャンバー内を 1×10^{-4} Pa まで排気した後、ガス導入口より Ar を放電ガスとして導入し (圧力 1.1 Pa), 高周波電力を投入することにより Ar プラズマを生成した。

放電圧力 1.1 Pa における Ar プラズマ密度の高周波投入電力依存性を Fig. 7 に示す。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、 1×10^{12} cm^{-3} に達する高密度プラズマを生成することが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、アンテナ系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、Fig. 8 に示すように、高密度プラズマが生成される条件においても、プラズマの低電位化が可能であることが示された。特に、比較的インダクタンスの大きいアンテナを用いた従来方式の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

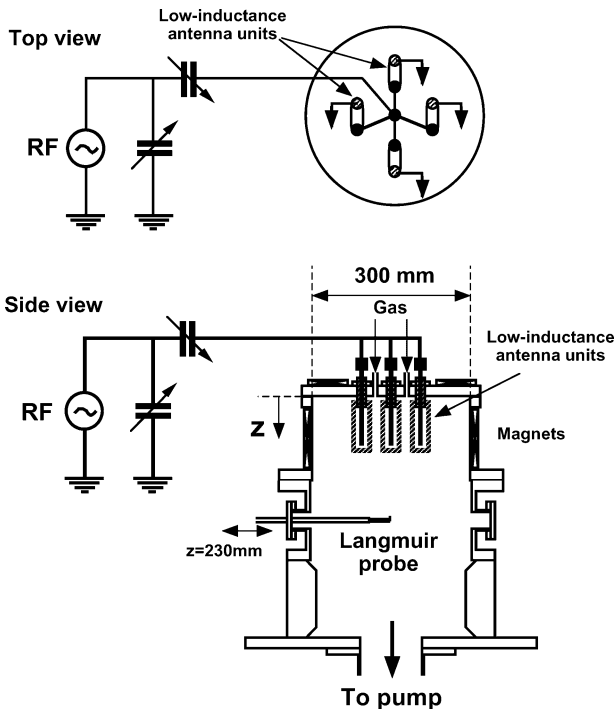


Fig. 6 Schematic diagram of experimental apparatus for examination of plasma properties sustained in 300-mm diameter discharge chamber.

値は直流成分と同程度かそれより大きいのが通例であるが、アンテナ系の低インダクタンス化 (低電圧駆動) により、高周波揺動が極めて抑制されたプラズマを生成可能であることを示している。このことは、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図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。

さらに、メートルサイズのプラズマ源へ大型化した際のプラズマ特性について、Fig. 9 に示す角形の製膜チャンバーを用いて調べた結果を示す。特に、このアンテナ配置では、側壁にアンテナを配置しているため、周辺部でのプラズマ密度が高くなることが予測される。このことを検証するため、流体シミュレーションコード [64] を開発し、基板表面付近 (図中で substrate heater と示した面) でのプラズマ密度分布を数値計算により求めた。この流体シミュ

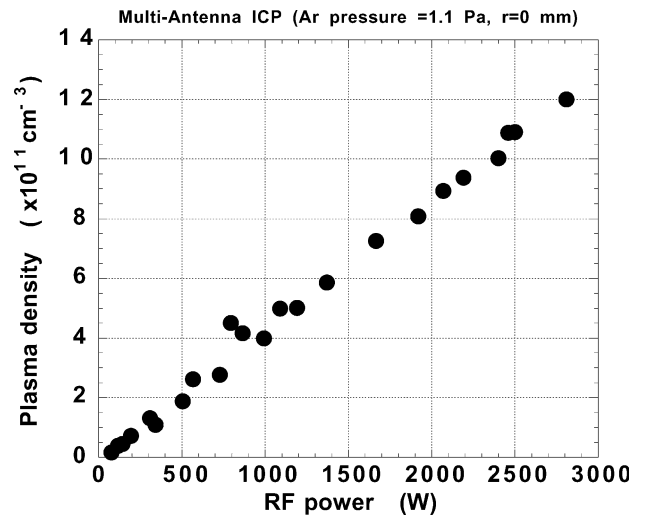


Fig. 7 Variation of Ar plasma density as a function of input RF power for Ar plasmas sustained at a pressure of 1.1 Pa.

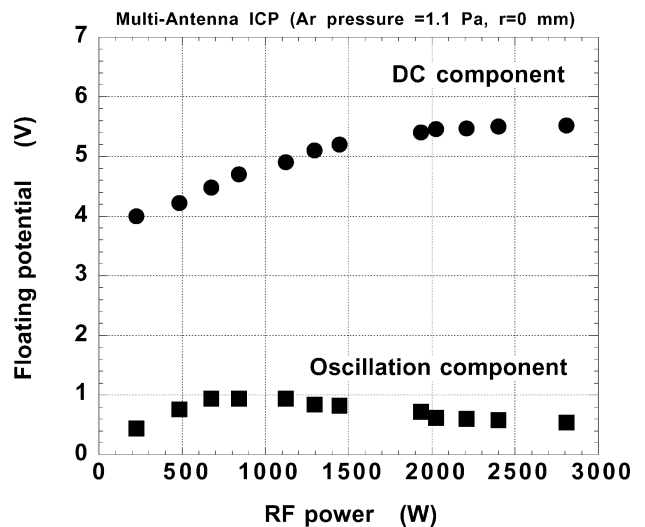


Fig. 8 Floating potential (d.c. component and oscillation component) of Ar plasmas sustained at a pressure of 1.1 Pa.

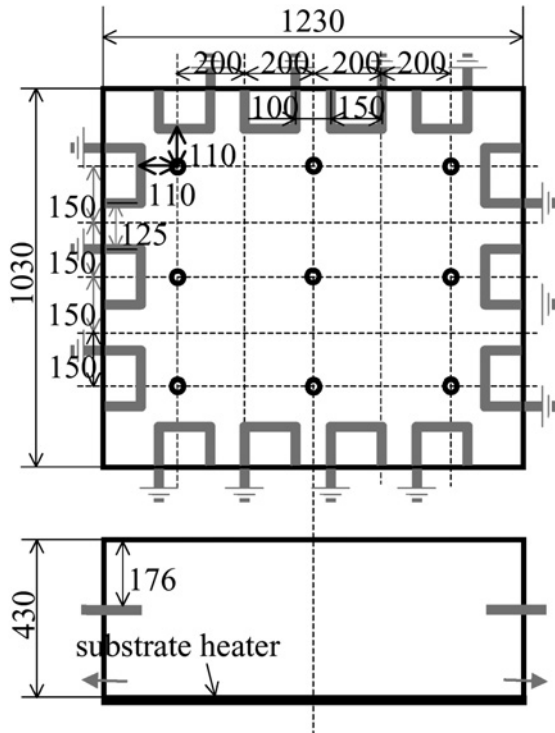


Fig. 9 Schematic diagram of meter-size plasma reactor.

レーションは、ドリフト拡散近似のもとで連続の式およびエネルギー方程式を解く流体モデルであり、プラズマへの高周波電力吸収については、エネルギー方程式においてアンテナ近傍のセルへの直接入力として与えている。この数値シミュレーションの結果である Fig. 10 は、Fig. 9 のアンテナ配置において、圧力 20 mTorr の Ar ガス中で周波数 13.56 MHz の高周波電力を 2.8 kW 投入した際の基板近傍でのプラズマ密度分布であり、チャンパー周辺部で高く、チャンパー中心部が低くなる傾向を示している。

数値シミュレーションの妥当性を検証するため、Fig. 10 のシミュレーションと同じプラズマ生成条件で実験を行い、ラングミュアプローブを用いて分布計測を行った結果を、シミュレーション結果と併せて Fig. 11 に示す。数値シミュレーションで得られたプラズマ密度分布は実験結果と良い一致を示しており、開発した流体シミュレーションコードの妥当性を示している。

さらに、LCD 製造プロセスにおける将来の第 8 世代 (基板サイズ 2,200 mm × 2,600 mm) 以降に対応するプロセスを念頭において、一辺の長さが 3 メートルの角形チャンパーでシミュレーションを行った事例を Fig. 12 に示す。この数値シミュレーションでは、等間隔に配置したアンテナを用いて、圧力 20 mTorr のアルゴン中で、周波数 13.56 MHz の高周波電力を各モジュールから等しく 1 kW ずつ投入した際の、基板近傍でのプラズマ密度分布を示している。プラズマ密度分布の最適化にまでは至っていないものの、面内均一性が ±10% 以内の範囲として 2,560 mm × 2,600 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。

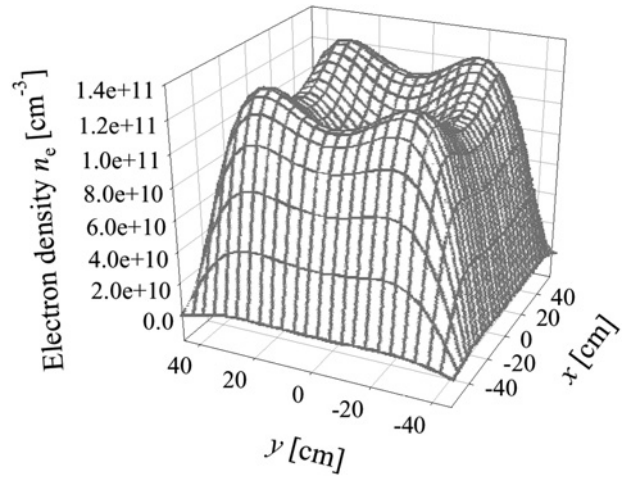


Fig. 10 Plasma density distribution numerically simulated with the fluid code.

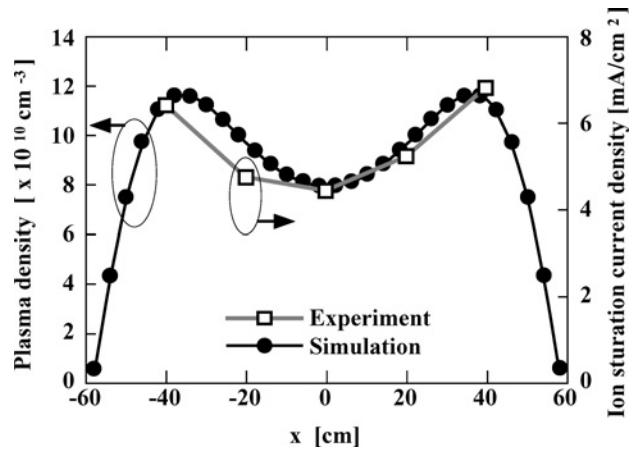


Fig. 11 Comparison of plasma profiles: experiment (open squares) and fluid code (solid circles).

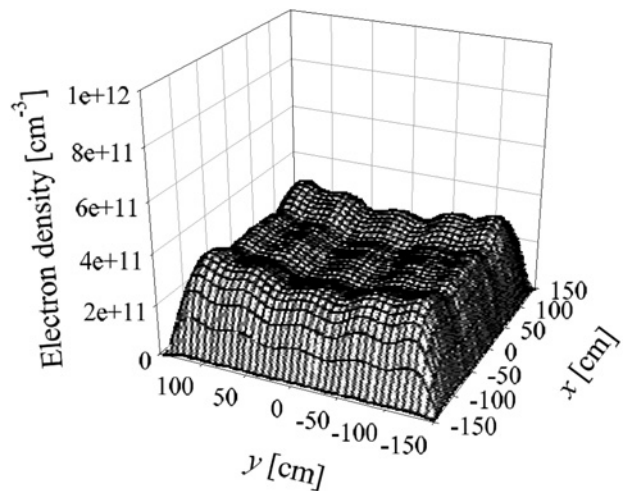


Fig. 12 Plasma density distribution numerically simulated for 3 m × 3 m plasma source.

5. まとめ

以上、本稿では次世代の平面ディスプレイ製造分野を念

頭に、メートルサイズを超える大面積プロセスが要求されている背景から、それに対応したプラズマ源のスケールアップにおける問題点と開発の現状について述べた。これまでに開発されてきた大面積プラズマ源では、プラズマ生成系における電力伝送路の特性長がプラズマ源と同等の大きさであることから、伝送路上での定在波の形成のために、プラズマに投入される高周波電力分布が不均一となる問題が残っている。このため、多くの開発事例では、この定在波形成を前提に、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を採用し、不均一性を改善するための研究開発が進められている。また、プロセス中におけるプラズマ分布の変動等に対応するための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（集中定数）を複数用いたマルチアンテナ方式の誘導結合プラズマ生成について、生成されるプラズマの基本的な特性とともに流体シミュレーションによる一辺3メートルの角形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おり、プロセス実証を含む実用化に向けた技術開発をさらに展開していく予定である。

謝辞

本解説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・ディーの江部明憲氏ならびに名古屋大学の庄司多津男先生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のもと斧研究室の杉浦慎哉氏の協力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。最後に、本研究の一部は、科学技術振興機構ならびに大阪科学技術センターの御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] A. Bogaerts, E. Neyts, R. Gijbels and J. van der Mullen, *Spectrochimica Acta B* **57**, 609 (2002).
- [3] 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.
- [4] 菅井秀郎：応用物理 **70**, 398 (2001).
- [5] A.A. Howling, J.L. Dorier, C. Hollenstein and U. Kroll, *J. Vac. Sci. Technol. A* **10**, 1080 (1992).
- [6] H.H. Goto, H.D. Lowe and T. Ohmi, *J. Vac. Sci. Technol. A* **10**, 3048 (1992).
- [7] A.A. Howling, J.L. Dorier, C. Hollenstein, U. Kroll and F. Finger, *J. Vac. Sci. Technol. A* **10**, 1080 (1992).
- [8] V. Vahedi, C.K. Birdsall, M.A. Lieberman, G. DiPeso and T.D. Rognlien, *Phys. Fluids B* **5**, 2719 (1993).
- [9] B.P. Wood, I. Henins, R.J. Gribble, W.A. Reass, R.J. Faehl, M. A. Nastasi and D. J. Rej, *J. Vac. Sci. Technol. B* **12**, 870 (1994).
- [10] K.K. Kalpakjian, M.A. Lieberman and W.G. Oldham, *J. Vac. Sci. Technol. B* **12**, 1351 (1994).
- [11] M.J. Colgan, M. Meyyappan and D.E. Murnick, *Plasma Sources Sci. Technol.* **3**, 181 (1994).
- [12] M. Meyyappan and M.J. Colgan, *J. Vac. Sci. Technol. A* **14**, 2790 (1996).
- [13] W. Tsai, G. Mueller, R. Lindquist, B. Frazier and V. Vahedi, *J. Vac. Sci. Technol. B* **14**, 3276 (1996).
- [14] L. Sansonnens, A. Pletzer, D. Magni, A.A. Howling, C. Hollenstein and J.P.M. Schmitt, *Plasma Sources Sci. Technol.* **6**, 170 (1997).
- [15] G.J. Nienhuis and W. Goedheer, *Plasma Sources Sci. Technol.* **8**, 295 (1999).
- [16] T. Kitajima, Y. Takeo and T. Makabe, *J. Vac. Sci. Technol. A* **17**, 2510 (1999).
- [17] T. Kitajima, Y. Takeo, Z.L. Petrovic and T. Makabe, *Appl. Phys. Lett.* **77**, 489 (2000).
- [18] J. Hopwood, *Plasma Sources Sci. Technol.* **1**, 109 (1992).
- [19] J. Hopwood, C.R. Guarneri, S.J. Whitehair and J.J. Cuomo, *J. Vac. Sci. Technol.* **11**, 152 (1993).
- [20] P.L.G. Ventzek, R.J. Hoekstra and M.J. Kushner, *J. Vac. Sci. Technol.* **12**, 461 (1994).
- [21] J. Hopwood, *Plasma Sources Sci. Technol.* **3**, 460 (1994).
- [22] L.J. Mahoney, A.E. Wendt, E. Barrios, C.J. Richards and J.L. Shohet, *J. Appl. Phys.* **76**, 2041 (1994).
- [23] R.A. Stewart, P. Vitello and D.B. Graves, *J. Vac. Sci. Technol. B* **12**, 478 (1994).
- [24] T. Okumura and I. Nakayama, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 5262 (1995).
- [25] U. Kortshagen, N.D. Gibson and J.E. Lawler, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **29**, 1224 (1996).
- [26] M.A. Sobolewski, *Phys. Rev. E* **56**, 1001 (1997).
- [27] I.M. El-Fayoumi and I.R. Jones, *Plasma Sources Sci. Technol.* **6**, 201 (1997).
- [28] J.T. Gudmundsson and M.A. Lieberman, *Plasma Sources Sci. Technol.* **7**, 1 (1998).
- [29] Y. Setsuhara, S. Miyake, Y. Sakawa and T. Shoji, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, 4263 (1999).
- [30] S. Miyake, Y. Setsuhara, Y. Sakawa and T. Shoji, *Vacuum* **59**, 472 (2000).
- [31] S.-H. Seo, C.W. Chung and H.-Y. Chang, *Surf. Coat. Technol.* **131**, 1 (2000).
- [32] Y. Setsuhara, S. Miyake, Y. Sakawa and T. Shoji, *Surf. Coat. Technol.* **136**, 60 (2001).
- [33] M. Moisan, C. Baudry and P. Leprince, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **PS-3**, 1004 (1975).
- [34] M. Moisan, A. Shivarova and A.W. Trivelpiece, *Plasma Phys.* **24**, 1331 (1982).
- [35] K. Komachi and S. Kobayashi, *J. Microwave Power Electromagn. Energy* **24**, 140 (1989).
- [36] F. Werner, D. Korzec and J. Engemann, *Plasma Sources Sci. Technol.* **3**, 473 (1994).
- [37] E. Bluem, S. Bechu, C. Boisse-Laporte, P. Leprince and J. Marec, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **28**, 1529 (1995).
- [38] T. Kimura, Y. Yoshida and S. Mizuguchi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, L1076 (1995).
- [39] M. Nagatsu, G. Xu, M. Yamage, M. Kanoh and H. Sugai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, L341 (1996).

- [40] I. Odrobina, J. Kuder and M. Kando, *Plasma Sources Sci. Technol.* **7**, 238 (1998).
- [41] H. Sugai, I. Ghanashev and M. Nagatsu, *Plasma Sources Sci. Technol.* **7**, 192 (1998).
- [42] F.M. Dias, E. Tatarova and C.M. Ferreira, *J. Appl. Phys.* **83**, 4602 (1998).
- [43] M. Nagatsu, S. Morita, I. Ghanashev, A. Ito, N. Toyoda and H. Sugai, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33**, 1143 (2000).
- [44] I. Ganachev and H. Sugai, *Surf. Coatings Technol.* **174-175**, 15 (2003).
- [45] J. Perrin, J. Schmitt, C. Hollenstein, A. Howling and L. Sansonnens, *Plasma Phys. Control. Fusion* **42**, B353 (2000).
- [46] K. Ono, *J. Plasma Fusion Res.* **80**, 909 (2004).
- [47] 白川 功, 梶谷洋司, 篠田庄司: 最新 回路理論 - 基礎と演習 (日本理工出版界, 1981).
- [48] Y. Wu and M. A. Lieberman, *Plasma Sources Sci. Technol.* **9**, 210 (2000).
- [49] M.H. Khater and L.J. Overzet, *Plasma Sources Sci. Technol.* **9**, 545 (2000).
- [50] E. Jaeger, L. Berry, J. Tolliver and D. Batchelor, *Phys. Plasmas* **2**, 2597 (1995).
- [51] M. Kushner, W. Collison, M. Grapperhaus, J. Holland and M. Barnes, *J. Appl. Phys.* **80**, 1337 (1996).
- [52] A. Lamm, *J. Vac. Sci. Technol. A* **15**, 2615 (1997).
- [53] J.P.M. Schmitt, *Thin Solid Films* **174**, 193 (1989).
- [54] M.A. Lieberman, J.P. Booth, P. Chabert, J.M. Rax and M. M. Turner, *Plasma Sources Sci. Technol.* **11**, 283 (2002).
- [55] V. Godyak and V. Kolobov, *Phys. Plasmas* **81**, 369 (1998).
- [56] G. Hwang and K. Giapis, *J. Appl. Phys.* **81**, 3433 (1997).
- [57] Y. Takeuchi, M. Murata, S. Uchino and Y. Kawai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 3405 (2001).
- [58] 竹谷元伸: 公開特許公報 特開平9-270299.
- [59] 篠原己拔: 公開特許公報 特開2001-321662.
- [60] 金田一要三: 公開特許公報 特開平8-236294.
- [61] A. Wendt and L. Mahoney, *Pure Appl. Chem.* **68**, 1055 (1996).
- [62] Y. Wu and M.A. Lieberman, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 777 (1998).
- [63] Y. Setsuhara, T. Shoji, A. Ebe, S. Baba, N. Yamamoto, K. Takahashi, K. Ono and S. Miyake, *Surf. Coat. Technol.* **174-175**, 33 (2003).
- [64] S. Sugiura, Y. Setsuhara, K. Takahashi and K. Ono, *Proc. 21st Symposium on Plasma Processing, Sapporo*, 28-30 Jan. 2004, ed. K. Ono (Kyoto, Japan Society of Applied Physics, 2004) p. 334 .