

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2014 年 10 月 2 日(02.10.2014)



(10) 国際公開番号
WO 2014/156756 A1

- (51) 国際特許分類:
C23C 16/511 (2006.01) *H05H 1/46* (2006.01)
C23C 16/52 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2014/057090
- (22) 国際出願日: 2014 年 3 月 17 日(17.03.2014)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2013-069712 2013 年 3 月 28 日(28.03.2013) JP
- (71) 出願人: ブラザー工業株式会社 (BROTHER KOGYO KABUSHIKI KAISHA) [JP/JP]; 〒4678561 愛知県名古屋市瑞穂区苗代町 1 5 番 1 号 Aichi (JP). 国立大学法人名古屋大学 (NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION NAGOYA UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒4648601 愛知県名古屋市千種区不老町 1 番 Aichi (JP).
- (72) 発明者: 滝 和也 (TAKI, Kazunari); 〒4678561 愛知県名古屋市瑞穂区苗代町 1 5 番 1 号 ブラザー工業株式会社内 Aichi (JP). 篠田 健太郎 (SHINODA, Kentaro); 〒4678561 愛知県名古屋市瑞穂区苗代町 1 5 番 1 号 ブラザー工業株式会社内 Aichi (JP). 金田 英樹 (KANADA, Hideki); 〒

4678561 愛知県名古屋市瑞穂区苗代町 1 5 番 1 号 ブラザー工業株式会社内 Aichi (JP). 上坂 裕之 (KOUSAKA, Hiroyuki); 〒4648601 愛知県名古屋市千種区不老町 1 番 国立大学法人名古屋大学内 Aichi (JP). 高岡 泰之 (TAKAOKA, Yasuyuki); 〒4648601 愛知県名古屋市千種区不老町 1 番 国立大学法人名古屋大学内 Aichi (JP).

(74) 代理人: 特許業務法人ネクスト (NEXT INTERNATIONAL); 〒4600003 愛知県名古屋市中区錦一丁目 1 1 番 2 0 号 大永ビルディング 7 階 Aichi (JP).

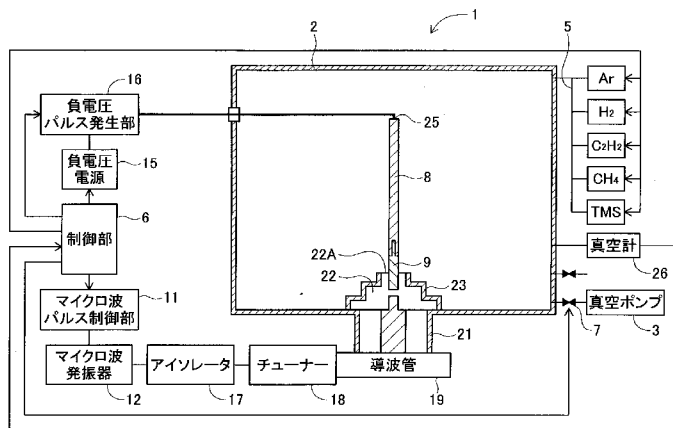
(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW,

[続葉有]

(54) Title: FILM FORMING DEVICE, FILM FORMING METHOD, AND FILM FORMING PROGRAM

(54) 発明の名称: 成膜装置、成膜方法及び成膜プログラム



- 3 Vacuum pump
6 Control unit
11 Microwave pulse control unit
12 Microwave oscillator
15 Negative voltage source
16 Negative voltage pulse generating unit
17 Isolator
18 Tuner
19 Waveguide
26 Vacuum gauge

(57) Abstract: The present invention is provided with: a microwave supplying unit that supplies microwaves for generating plasma along a surface to be treated of conductive material to be worked; a negative voltage application unit that applies to the material to be worked a negative bias voltage that expands a sheath layer along the surface to be treated of the material to be worked; and a control unit that controls the microwave supplying unit and the negative voltage application unit. The microwave supplying unit has a microwave supply opening that makes the supplied microwaves propagate to the sheath layer that has expanded. The control unit controls the microwave supplying unit and the negative voltage application unit such that the sheath thickness of the sheath layer changes during the supplying of the microwaves.

(57) 要約: 導電性を有する被加工材料の処理表面に沿ってプラズマを生成させるためのマイクロ波を供給するマイクロ波供給部と、前記被加工材料の処理表面に沿うシース層を拡大させる負のバイアス電圧を前記被加工材料に印加する負電圧印加部と、前記マイクロ波供給部と前記負電圧印加部とを制御する制御部と、を備え、前記マイクロ波供給部は、供給するマイクロ波を拡大された前記シース層へ伝搬させるマイクロ波供給口を有し、前記制御部は、前記マイクロ波の供給中に、前記シース層のシース厚さを変化させるように前記マイクロ波供給部と前記負電圧印加部とを制御する。



MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラ
シア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッ
パ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI,
FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK,
MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR),

OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM,
ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：成膜装置、成膜方法及び成膜プログラム

技術分野

[0001] 本発明は、プラズマを用い、鋼材等の導電性を有する被加工材料の表面に皮膜を形成するための成膜装置、成膜方法及び成膜プログラムに関するものである。

背景技術

[0002] 従来より、プラズマを用い、鋼材等の導電性を有する被加工材料の表面に皮膜を形成するための成膜装置に関し種々提案されている。

例えば、上述した被加工材料の表面にダイヤモンドライクカーボン（以下、「DLC」という。）成膜処理する技術が特開2004-47207号公報等により知られている。

[0003] この特開2004-47207号公報に開示された技術では、プラズマ生成装置がマイクロ波供給口である石英窓を通して処理容器内の被加工材料に向けマイクロ波を供給することにより、石英窓内面の周辺領域にプラズマが生成される。被加工材料は例えば棒状であり、石英窓内面から処理容器内に突出するように配置され、生成されたプラズマに覆われた被加工材料の石英窓内面の周辺部分にはシース層が生成される。続いて、マイクロ波の供給中に、プラズマ生成装置が被加工材料へ負のバイアス電圧を印加する。

[0004] この結果、被加工材料の表面に生成されたシース層は被加工材料の表面に沿って拡大する。また同時に、供給されたマイクロ波は、この拡大されたシース層に沿って高エネルギー密度の表面波として伝搬する。このとき、高エネルギー密度の表面波により石英窓内面周辺から離れた被加工材料の表面にもプラズマが生成され、シース層も生成される。この新たに生成されたシース層も負のバイアス電圧によって拡大され、この拡大されたシース層に沿ってマイクロ波が高エネルギー密度の表面波としてさらに伝搬する。これにより、被加工材料の石英窓周辺から離れた部分へ、すなわち、被加工材料の石

英窓側の一端から処理容器内に突出した他端へとプラズマが伸長する。この結果、原料ガスが表面波によってプラズマ励起されて高密度プラズマとなり、被加工材料の表面全体にDLC成膜処理される。

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] しかしながら、特開2004-47207号公報に開示された技術では、被加工材料に印加される負のバイアス電圧は一定である。そのため、シース層内を高エネルギー密度の表面波として伝搬するマイクロ波の一部が、被加工材料のマイクロ波の供給側とは反対側において反射され、被加工材料のマイクロ波伝搬方向に沿った定在波となる。その結果、表面波によってプラズマ励起される高密度プラズマに定在波分布に応じたプラズマ密度分布が生じて、皮膜の膜厚、膜硬度等の膜特性が不均一になるという問題がある。

[0006] そこで、本発明は、上述した問題点を解決するためになされたものであり、被加工材料の表面に形成された皮膜の膜厚、膜硬度等の膜特性を均一化することができる成膜装置、成膜方法及び成膜プログラムを提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0007] 前記目的を達成するため本発明の成膜装置は、導電性を有する被加工材料の処理表面に沿ってプラズマを生成させるためのマイクロ波を供給するマイクロ波供給部と、前記被加工材料の処理表面に沿うシース層を拡大させる負のバイアス電圧を前記被加工材料に印加する負電圧印加部と、前記マイクロ波供給部と前記負電圧印加部とを制御する制御部と、を備え、前記マイクロ波供給部は、供給するマイクロ波を拡大された前記シース層へ伝搬させるマイクロ波供給口を有し、前記制御部は、前記マイクロ波の供給中に、前記シース層のシース厚さを変化させるように前記マイクロ波供給部と前記負電圧印加部とを制御することを特徴とする。

[0008] このような成膜装置では、マイクロ波供給部によるマイクロ波の供給中に、シース層を生成すると共に、シース層のシース厚さを変化させることによ

って、シース層内を高エネルギー密度の表面波として伝搬するマイクロ波によって生成される定在波の分布を変化させることができる。これにより、表面波によってプラズマ励起された原料ガスの高密度プラズマのプラズマ密度の分布を変化させることができ、被加工材料の表面に形成された皮膜の膜厚、膜硬度等の膜特性を均一化することができる。

[0009] また、前記本発明の成膜装置において、前記制御部は、前記マイクロ波供給部によるマイクロ波の供給中に、前記被加工材料に印加される前記負のバイアス電圧の電圧値を変化させて前記シース厚さを変化させるように前記負電圧印加部を駆動制御するようにしてもよい。

[0010] このような成膜装置では、マイクロ波供給部によるマイクロ波の供給中に、被加工材料に印加される負のバイアス電圧の電圧値を変化させてシース厚さを変化させるため、シース層のシース厚さを高速に変化させることができる。これにより、シース層内を高エネルギー密度の表面波として伝搬するマイクロ波によって生成される定在波の分布変化を高速に行い、高速成膜への追従性の向上を図ることができる。

[0011] また、前記本発明の成膜装置において、前記制御部は、前記マイクロ波供給部によるマイクロ波の供給中に、前記被加工材料に電圧値の異なる複数種類のパルス状の負のバイアス電圧を順次印加して、前記シース厚さの拡大と減縮を繰り返すように前記負電圧印加部を駆動制御するようにしてもよい。

[0012] このような成膜装置では、マイクロ波供給部によるマイクロ波の供給中に、被加工材料に電圧値の異なる複数種類のパルス状の負のバイアス電圧を順次印加して、シース厚さの拡大と減縮を繰り返す。これにより、シース層内を高エネルギー密度の表面波として伝搬するマイクロ波によって生成される定在波の分布変化を均一化することができ、被加工材料の表面に形成された皮膜の膜厚、膜硬度等の膜特性の更なる均一化を図ることができる。

[0013] また、前記本発明の成膜装置において、前記制御部は、前記マイクロ波供給部によるマイクロ波の供給中に、前記被加工材料に印加される前記負のバイアス電圧の電圧値を1パルス毎又は複数パルス毎に徐々に変化させるよう

に前記負電圧印加部を駆動制御するようにしてもよい。

[0014] このような成膜装置では、マイクロ波供給部によるマイクロ波の供給中に、被加工材料に印加される負のバイアス電圧の電圧値を1パルス毎又は複数パルス毎に徐々に変化させることによって、被加工材料の表面に所望の膜特性を有する皮膜を形成することができる。

[0015] 例えば、負のバイアス電圧の電圧値を1パルス毎又は複数パルス毎に徐々に大きくした場合には、被加工材料の表面に形成される皮膜の硬度が徐々に大きくなり、皮膜の被加工材料への密着性の向上を図ることができる。また、負のバイアス電圧の電圧値を1パルス毎又は複数パルス毎に徐々に小さくした場合には、被加工材料の表面に形成される皮膜の硬度が徐々に小さくなり、摺動する接触部材へのなじみの向上を図ることができる。

[0016] また、前記本発明の成膜装置において、前記制御部は、前記被加工材料に前記負のバイアス電圧を印加する負電圧電極の形状が、前記シース層内を前記マイクロ波が表面波として伝搬する伝搬方向において、不連続部を形成する場合には、前記シース層内を伝搬する前記表面波の波長に基づいて前記負のバイアス電圧の電圧値を変化させるようにしてもよい。

[0017] このような成膜装置では、被加工材料に負のバイアス電圧を印加する負電圧電極の形状が、シース層内をマイクロ波が伝搬する伝搬方向において、不連続部を形成する場合には、シース層内を伝搬する表面波の波長に基づいて負のバイアス電圧の電圧値を変化させる。これにより、定在波の分布を変化させることが可能となり、被加工材料の表面に形成された皮膜の膜厚、膜硬度等の膜特性の更なる均一化を図ることができる。

[0018] 更に、前記本発明の成膜装置において、前記マイクロ波供給部は、前記被加工材料にパルス状のマイクロ波を供給し、前記制御部は、前記マイクロ波の1パルス内において、前記負のバイアス電圧の電圧値を変化させて前記シース厚さを変化させるように前記負電圧印加部を駆動制御するようにしてもよい。

[0019] このような成膜装置では、パルス状のマイクロ波の1パルス内において、

負のバイアス電圧の電圧値を変化させてシース層のシース厚さを変化させることによって、被加工材料の表面に沿って生成されたシース層によりプラズマを高速で伸長させることができる。また、プラズマが安定した場合には、所定シース厚さで被加工材料の表面に皮膜を形成することができる。

[0020] また、本発明の成膜方法は、導電性を有する被加工材料にマイクロ波供給口を介してマイクロ波を供給するマイクロ波供給部と、負のバイアス電圧を前記被加工材料に印加する負電圧印加部と、制御部と、を備えた成膜装置で実行される成膜方法であって、前記制御部が実行する、前記マイクロ波供給部を介して前記被加工材料の処理表面に沿ってプラズマを生成させるためのマイクロ波を供給するマイクロ波供給工程と、前記負電圧印加部を介して前記被加工材料の処理表面に沿うシース層を拡大させる負のバイアス電圧を前記被加工材料に印加する負電圧印加工程と、前記マイクロ波供給口を介して供給されるマイクロ波を拡大された前記シース層へ伝搬させるマイクロ波伝搬工程と、前記マイクロ波供給部と前記負電圧印加部とを制御する制御工程と、を備え、前記制御部は、前記制御工程において、前記マイクロ波の供給中に、前記シース層のシース厚さを変化させるように前記マイクロ波供給部と前記負電圧印加部とを制御することを特徴とする。

[0021] このような成膜方法では、マイクロ波供給部によるマイクロ波の供給中に、シース層を生成すると共に、シース層のシース厚さを変化させることによって、シース層内を高エネルギー密度の表面波として伝搬するマイクロ波によって生成される定在波の分布を変化させることができる。これにより、表面波によってプラズマ励起された原料ガスの高密度プラズマのプラズマ密度の分布を変化させることができ、被加工材料の表面に形成された皮膜の膜厚、膜硬度等の膜特性を均一化することができる。

[0022] また、本発明の成膜プログラムは、導電性を有する被加工材料にマイクロ波供給口を介してマイクロ波を供給するマイクロ波供給部と、負のバイアス電圧を前記被加工材料に印加する負電圧印加部と、を備えた成膜装置を制御するコンピュータに、前記マイクロ波供給部を介して前記被加工材料の処理

表面に沿ってプラズマを生成させるためのマイクロ波を供給するマイクロ波供給工程と、前記負電圧印加部を介して前記被加工材料の処理表面に沿うシース層を拡大させる負のバイアス電圧を前記被加工材料に印加する負電圧印加工程と、前記マイクロ波供給口を介して供給されるマイクロ波を拡大された前記シース層へ伝搬させるマイクロ波伝搬工程と、前記マイクロ波供給部と前記負電圧印加部とを制御する制御工程を実行させ、前記制御工程において、前記マイクロ波の供給中に、前記シース層のシース厚さを変化させるように前記マイクロ波供給部と前記負電圧印加部とを制御するように実行させるためのプログラムである。

[0023] このような成膜プログラムでは、コンピュータは当該プログラムを読み込むことによって、マイクロ波供給部によるマイクロ波の供給中に、シース層を生成すると共に、シース層のシース厚さを変化させることによって、シース層内を高エネルギー密度の表面波として伝搬するマイクロ波によって生成される定在波の分布を変化させることができる。これにより、コンピュータは、表面波によってプラズマ励起された原料ガスの高密度プラズマのプラズマ密度の分布を変化させることができ、被加工材料の表面に形成された皮膜の膜厚、膜硬度等の膜特性を均一化することができる。

図面の簡単な説明

[0024] [図1]第1実施形態に係る成膜装置の概略構成を示す説明図である。

[図2]第1実施形態に係る成膜装置の電氣的構成を示すブロック図である。

[図3]プラズマ電子密度 $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ におけるシース層のシース厚さと表面波の波長の解析結果の一例を示す図である。

[図4]シース層のシース厚さ 1 mm におけるプラズマの電子密度と表面波の波長の解析結果の一例を示す図である。

[図5]負のバイアス電圧を一定電圧にしたときにおけるプラズマの電子密度とシース層のシース厚さの解析結果の一例を示す図である。

[図6]不連続部における表面波の反射を説明する説明図である。

[図7]シース厚さの変化に対する表面波の定在波分布の変化を説明する説明図

である。

[図8]表面波の定在波分布が変化しときの不連続部からの距離と定在波強度との一例を示す図である。

[図9]マイクロ波パルスの波形、及び負のバイアス電圧パルスの波形の模式図である。

[図10]第1実施形態に係る制御部のROMに格納される駆動電圧テーブルの一例を示す図である。

[図11]第1実施形態に係る制御部のCPUが実行する「成膜処理」を示すメインフローチャートである。

[図12]図11の「シース厚さ制御処理1」のサブ処理を示すサブフローチャートである。

[図13]マイクロ波パルスの1パルス毎に異なる負のバイアス電圧を印加した一例を示す図である。

[図14]第2実施形態に係る制御部のCPUが、マイクロ波パルスの1パルス内で負のバイアス電圧の電圧値を変化させた一例を示す図である。

[図15]第2実施形態に係る制御部のCPUが実行する「シース厚さ制御処理2」のサブ処理を示すサブフローチャートである。

[図16]図14に対応するプラズマ伸長状態を説明する説明図である。

[図17]第3実施形態に係る成膜装置において、マイクロ波パルスの1パルス毎に異なる負のバイアス電圧を印加した一例を示す図である。

[図18]図17に対する成膜状態を説明する説明図である。

[図19]図17のDLC膜の厚さ方向の硬度変化を説明する説明図である。

[図20]第4実施形態に係る成膜装置において、マイクロ波パルスの1パルス毎に異なる負のバイアス電圧を印加した一例を示す図である。

[図21]第4実施形態に係る成膜装置において、マイクロ波パルスの2パルス毎に異なる負のバイアス電圧を印加した一例を示す図である。

[図22]第5実施形態に係る成膜装置において、マイクロ波パルスの1パルス毎に異なる負のバイアス電圧を印加した一例を示す図である。

[図23]第6実施形態に係る成膜装置において、マイクロ波パルスの1パルス毎に異なる負のバイアス電圧を印加した一例を示す図である。

[図24]図23に対する成膜状態を説明する説明図である。

発明を実施するための形態

[0025] 以下、本発明に係る成膜装置について具体化した第1実施形態乃至第7実施形態に基づき図面を参照しつつ詳細に説明する。先ず、第1実施形態に係る成膜装置1の概略構成について図1及び図2に基づいて説明する。

[0026] [第1実施形態]

図1及び図2に示すように、第1実施形態に係る成膜装置1は、処理容器2、真空ポンプ3、ガス供給部5、及び制御部6等から構成されている。処理容器2は、ステンレス等の金属製であって、気密構造の処理容器である。真空ポンプ3は、圧力調整バルブ7を介して処理容器2の内部を真空排気可能なポンプである。処理容器2の内部には、成膜対象である導電性を有する被加工材料8が、ステンレス等で形成された導電性を有する保持具9により保持されている。

[0027] 被加工材料8の材質は、導電性を有していれば、特に限定されるものではないが、第1実施形態では低温焼戻し鋼である。ここで低温焼戻し鋼とは、JIS G4051（機械構造用炭素鋼鋼材）、G4401（炭素工具鋼鋼材）、G44-4（合金工具用鋼材）、又はマルエージング鋼材などの材料である。被加工材料は、低温焼戻し鋼以外にも、セラミック、または樹脂に導電性の材料がコーティングされているものでもよい。

[0028] ガス供給部5は、処理容器2の内部に成膜用の原料ガスと不活性ガスを供給する。具体的には、He、Ne、Ar、Kr、またはXeなどの不活性ガスとCH₄、C₂H₂、又はTMS（テトラメチルシラン）等の原料ガスとが供給される。第1実施形態では、C₂H₂、CH₄、およびTMSの原料ガスにより被加工材料8がDLC成膜処理されるとして説明する。

[0029] また、ガス供給部5から供給される原料ガス、および不活性ガスの流量、および圧力が後述するCPU31により制御されてもよいし、作業員により

制御されてもよい。また、原料ガスは、アルキン、アルケン、アルカン、芳香族化合物などのC H結合を有する化合物、または炭素が含まれる化合物が含まれるガスであればよい。また、H₂が原料ガスに含まれてもよい。

[0030] 処理容器2の内部に保持された被加工材料8に対してDLC成膜処理を行うためのプラズマが発生される。このプラズマは、マイクロ波パルス制御部11、マイクロ波発振器12、マイクロ波電源13（図2参照）、負電圧電源15、及び負電圧パルス発生部16により発生される。第1実施形態では、特開2004-47207号公報に開示された方法（以下、「MVP法（Microwave Voltage coupled Plasma法）」という。）により表面波励起プラズマが発生されるとして説明する。以降の記載では、MVP法を説明する。

[0031] マイクロ波パルス制御部11は制御部6の指示に従い、パルス信号を発振し、この発振したパルス信号をマイクロ波発振器12へ供給する。マイクロ波発振器12は、マイクロ波パルス制御部11からのパルス信号に従って、マイクロ波パルスが発生する。マイクロ波電源13は、制御部6の指示に従い、指示された出力で2.45GHzのマイクロ波を発振するマイクロ波発振器12へ電力を供給する。つまり、マイクロ波発振器12は、2.45GHzのマイクロ波をマイクロ波パルス制御部11からのパルス信号に従って、パルス状のマイクロ波パルスで後述するアイソレータ17に供給する。

[0032] そして、マイクロ波パルスは、マイクロ波発振器12からアイソレータ17、チューナー18、導波管19、導波管19から図示されない同軸導波管変換器を介して突設された同軸導波管21、及び石英などのマイクロ波を透過する誘電体等からなるマイクロ波供給口22を経由し、保持具9及び被加工材料8の処理表面に供給される。アイソレータ17は、マイクロ波の反射波がマイクロ波発振器12へ戻ることを防ぐものである。チューナー18は、マイクロ波の反射波が最小になるようにチューナー18前後のインピーダンスを整合するものである。

[0033] マイクロ波供給口22の上端面22Aを除く外周面は、ステンレス等の金

属で形成された側面電極 2 3 で被覆されている。側面電極 2 3 は、処理容器 2 の内側面にネジ止め等によって固定され、電氣的に処理容器 2 に接続されている。マイクロ波供給口 2 2 の中央には同軸導波管 2 1 の中心導体が延長されている。保持具 9 も中心導体の延長上にあり、マイクロ波供給口 2 2 内では中心導体となる。従って、マイクロ波供給口 2 2 の中心導体と側面電極 2 3 とで同軸導波管として機能する。

[0034] このため、マイクロ波供給口 2 2 に供給されたマイクロ波パルスによって、保持具 9 が設けられた上端面 2 2 A 付近にマイクロ波が伝搬してプラズマが生成される。また、被加工材料 8 の保持具 9 に対して反対側の部分は、マイクロ波供給口 2 2 に対して処理容器 2 の内側に向かって突出するように配置され、負のバイアス電圧パルスを印加するための負電圧電極 2 5 が電氣的に接続されている。

[0035] マイクロ波供給口 2 2 の中心導体は真空を保持するため、途中で分断されているが、誘電体とのろう付け等で真空が保持されれば、貫通していてもよい。被加工材料 8 は、例えば棒状であり、マイクロ波供給口 2 2 の中心導体の延長線上に保持される。保持具 9 の代わりに被加工材料 8 の一部がマイクロ波供給口 2 2 内の中心導体となるように保持されてもよい。

[0036] 負電圧電源 1 5 は、制御部 6 の指示に従い、負電圧パルス発生部 1 6 に負のバイアス電圧を供給する。負電圧パルス発生部 1 6 は、負電圧電源 1 5 から供給された負のバイアス電圧をパルス化する。このパルス化の処理は、負電圧パルス発生部 1 6 が制御部 6 の指示に従い、負のバイアス電圧パルスの大きさ、周期、及び、デューティ比を制御する処理である。このパルス状の負のバイアス電圧である負のバイアス電圧パルスが、処理容器 2 の内部に保持された被加工材料 8 に負電圧電極 2 5 を介して印加される。

[0037] 即ち、被加工材料 8 が、金属基材の場合、またはセラミック、または樹脂に導電性の材料がコーティングされた場合であっても、被加工材料 8 の少なくとも処理表面全域に負のバイアス電圧パルスが印加される。また、保持具 9 の表面全域にも被加工材料 8 を介して負のバイアス電圧パルスが印加され

る。

[0038] 図7に示すように、発生されたマイクロ波パルス、および負のバイアス電圧パルスの少なくとも一部が同一時間に印加されるように制御されることにより表面波励起プラズマ45が発生される。マイクロ波は2.45GHzに限らず、0.3GHz～50GHzの周波数であればよい。負電圧電源15、および負電圧パルス発生部16が本発明の負電圧印加部の一例である。

[0039] マイクロ波制御部11、マイクロ波発振器12、マイクロ波電源13、アイソレータ17、チューナー18、導波管19、同軸導波管21およびマイクロ波供給口22が本発明のマイクロ波供給部の一例である。尚、成膜装置1は負電圧電源15、および負電圧パルス発生部16を備えたが、正電圧電源、および正電圧パルス発生部を備えても良いし、負電圧パルス発生部16の代わりに、パルス状の負のバイアス電圧でなく、連続する負のバイアス電圧を印加する負電圧発生部を備えてもよい。

[0040] 成膜装置1が、連続する負のバイアス電圧を印加する負電圧発生部を備える場合、正電圧パルス発生部も備えるのが望ましい。連続する負のバイアス電圧が、被加工材料8に印加され続けると、アーキングが発生しやすくなる。このアーキングの発生を低減するためにパルス状の正のバイアス電圧が、負のバイアス電圧が印加される期間の内、負のバイアス電圧が印加される期間の数パーセントの期間において印加されるのが望ましい。

[0041] 図2に示すように、制御部6は、負電圧電源15とマイクロ波電源13に制御信号を出力してマイクロ波パルスの印加電力と負電圧パルスの印加電圧を制御する。制御部6は、負電圧パルス発生部16及びマイクロ波パルス制御部11に制御信号を出力することによって、パルス状の負のバイアス電圧パルスの印加タイミング、供給電圧、及びマイクロ波発振器12から発生されるマイクロ波パルスの供給タイミング、及び供給電力を制御する。

[0042] また、制御部6は、ガス供給部5に流量制御信号を出力して原料ガス及び不活性ガスの供給を制御する。制御部6は、処理容器2に取り付けられた真空計26から入力される処理容器2内の圧力を表す圧力信号に基づいて、制

御信号を圧力調整バルブ 7 に出力して、処理容器 2 内の圧力を制御する。

[0043] 制御部 6 は、CPU 31、RAM 32、ROM 33、ハードディスクドライブ（以下、「HDD」という。）34、時間を計測するタイマ 35、図 11 に示す「シース厚さ制御処理 1」のサブ処理の処理時間を計測する終了判定用タイマ 36 等を備え、コンピュータから構成される。CPU 31 は、RAM 32 等の揮発性記憶装置に種々の情報を一時記憶し、図 11 に示す成膜処理等のプログラムを実行して、成膜装置 1 の全体の制御を行う。ROM 33 と HDD 34 は、不揮発性記憶装置であり、図 11 に示す成膜処理等のプログラム、図 9 に示すマイクロ波パルスと負のバイアス電圧パルスの印加タイミング、図 10 に示す印加電圧テーブル 55 等を記憶している。

[0044] 更に、制御部 6 には、圧力調整バルブ 7、真空計 26、負電圧電源 15、負電圧パルス発生部 16、マイクロ波パルス制御部 11、ガス供給部 5、及びマイクロ波電源 13 が電氣的に接続されている。尚、図 11 に示す成膜処理のプログラムは、図示しないドライバにより CD-ROM、または DVD-ROM などの記憶媒体から読み込まれてもよいし、図示しないインターネットなどのネットワークからダウンロードされてもよい。

[0045] [表面波励起プラズマの説明]

通常、表面波励起プラズマを発生させる場合、ある程度以上の電子（イオン）密度におけるプラズマと、これに接する誘電体との界面に沿ってマイクロ波が供給される。供給されたマイクロ波は、この界面に電磁波のエネルギーが集中した状態で表面波として伝播される。その結果、界面に接するプラズマは高エネルギー密度の表面波によって励起され、さらに増幅される。これにより高密度プラズマが生成されて維持される。ただし、この誘電体を導電性材料に換えた場合、導電性材料は表面波の導波路としては機能せず、好ましい表面波の伝播及びプラズマ励起を生ずることはできない。

[0046] 一方、プラズマに接する物体の表面近傍には、本質的に単一極性の荷電粒子層、いわゆるシース層が形成される。物体が、負のバイアス電圧を加えた導電性を有する被加工材料 8 の場合、シース層とは電子密度が低い層、すな

わち、正極性であって、マイクロ波の周波数帯においてはほぼ比誘電率 $\epsilon \approx 1$ の層である。このため、印加する負のバイアス電圧の絶対値を例えば -100 V の絶対値より大きくすることによりシース層のシース厚さを厚くできる。すなわちシース層が拡大する。このシース層が、プラズマとプラズマに接する物体との界面に表面波を伝播させる誘電体として作用する。

[0047] 従って、被加工材料 8 を保持する保持具 9 の一端に近接して配置されたマイクロ波供給口 22 からマイクロ波が供給され、かつ被加工材料 8 及び保持具 9 に負のバイアス電圧が印加されると、マイクロ波はシース層とプラズマとの界面に沿って表面波として伝搬する。この結果、被加工材料 8 及び保持具 9 の表面に沿って表面波に基づく高密度励起プラズマが発生する。この高密度励起プラズマが、上述した表面波励起プラズマ 45 である。

[0048] このような被加工材料 8 の表面の近傍での表面波励起による高密度プラズマの電子密度は $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ に達する。この MVP 法を用いたプラズマ CVD により DLC 成膜処理される場合は、通常の負のバイアス電圧エネルギーのプラズマ CVD により DLC 成膜処理される場合よりも 1 桁から 2 桁高い成膜速度 $3 \sim 30$ (ナノ m/秒) が得られる。この結果、MVP 法によるプラズマ CVD の成膜時間は通常のプラズマ CVD の成膜時間の $1/10 \sim 1/100$ となる。

[0049] ここで、プラズマの電子密度が 10^{12} cm^{-3} における、被加工材料 8 の表面に形成されたシース層のシース厚さとシース層を伝搬する表面波の波長との関係について図 3 に基づいて説明する。尚、被加工材料 8 は、直径 10 mm の円柱状に形成されている。

[0050] 図 3 に示すように、例えば、シース厚さ約 0.4 mm のときの表面波の波長は、約 30 mm である。また、シース厚さ約 0.6 mm のときの表面波の波長は、約 39 mm である。また、シース厚さ約 1.0 mm のときの表面波の波長は、約 52 mm である。従って、シース層のシース厚さが厚くなるに従って、表面波の波長は長くなる。つまり、シース層のシース厚さを大きくすることによって、表面波の波長を長くすることができ、シース層のシース

厚さを小さくすることによって、表面波の波長を短くすることができる。

[0051] 次に、シース層のシース厚さが1 mmにおける、プラズマの電子密度と表面波の波長との関係について図4に基づいて説明する。尚、黒丸印は、被加工材料8が直径1 mmの円柱の時のデータを表している。黒四角印は、被加工材料8が直径10 mmの円柱の時のデータを表している。

[0052] 図4に示すように、例えば、プラズマの電子密度が $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ の時には、被加工材料8が直径1 mmの場合の表面波の波長は、約39 mmであり、被加工材料8が直径10 mmの場合の表面波の波長は、約19 mmである。また、プラズマの電子密度が約 10^{12} cm^{-3} の時には、被加工材料8が直径1 mmの場合の表面波の波長は、約73 mmであり、被加工材料8が直径10 mmの場合の表面波の波長は、約52 mmである。従って、プラズマの電子密度が高くなるに従って、表面波の波長は長くなる。つまり、マイクロ波の出力を大きくしてプラズマの電子密度を上昇させることによって、表面波の波長を長くすることができ、マイクロ波の出力を小さくしてプラズマの電子密度を低下させることによって、表面波の波長を短くすることができる。

[0053] 次に、負のバイアス電圧を一定電圧にしたときにおける、プラズマの電子密度とシース層のシース厚さとの関係について図5に基づいて説明する。尚、負のバイアス電圧は、0 V、-200 V、-400 Vとし、プラズマ電位を+30 Vとした。従って、プラズマ電位に対する被加工材料8の電位であるシース電位が約-30 V、約-230 V、約-430 Vのそれぞれについてプラズマの電子密度とシース層のシース厚さとを解析した。

[0054] 図5に示すように、例えば、プラズマの電子密度が $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ では、負のバイアス電圧が-30 Vの時のシース層のシース厚さは、約0.1 mmであり、負のバイアス電圧が-230 Vの時のシース層のシース厚さは、約0.5 mmであり、負のバイアス電圧が-430 Vの時のシース層のシース厚さは、約0.9 mmである。また、プラズマの電子密度が 10^{12} cm^{-3} では、負のバイアス電圧が-30 Vの時のシース層のシース厚さは、約0.

0.6 mmであり、負のバイアス電圧が -230 V の時のシース層のシース厚さは、約0.4 mmであり、負のバイアス電圧が -430 V の時のシース層のシース厚さは、約0.6 mmである。

[0055] 従って、プラズマの電子密度が一定の場合には、負のバイアス電圧が大きくなるに従って、シース層のシース厚さは大きくなる。つまり、マイクロ波パルスの出力電力をほぼ一定にしてプラズマの電子密度をほぼ一定にした場合には、負のバイアス電圧を大きくすることによって、シース層のシース厚さを大きくすることができ、負のバイアス電圧を小さくすることによって、シース層のシース厚さを小さくすることができる。

[0056] [表面波の定在波分布]

次に、表面波の定在波分布について図3、図6乃至図8に基づいて説明する。

図6(A)に示すように、被加工材料8の先端部と負電圧電極25との接続部分において、マイクロ波の供給方向である図6(A)中の上下方向において、不連続な形状の不連続部41が形成されている場合には、不連続部41の周辺の表面に形成されるシース層42が不連続な形状になる。そのため、シース層42内を表面波として伝搬するマイクロ波は、この不連続部41の周辺に形成されたシース層42の不連続な部分で反射され、マイクロ波供給口22の上端面22Aから供給されるマイクロ波による表面波と干渉して、定在波を生成する。

[0057] 例えば、図7(A)に模式的に示すように、シース層42のマイクロ波の伝搬方向に対して直交する方向のシース厚さが小さい場合には、図3に示すようにシース層42内を伝搬する表面波の波長は短くなるため、不連続部41で反射された表面波は、シース厚さ、プラズマの電子密度、及び被加工材料8の直径で定まる波長で定在波43を生成し、表面波励起プラズマ45が定在波43の $1/2$ 周期で密度分布する。そのため、表面波励起プラズマ45のプラズマ密度分布は、被加工材料8のマイクロ波の供給方向にプラズマ密度が低い節がいくつか発生し、各節の間にプラズマ密度が極大になる極大部

が発生する。

[0058] また、例えば、図7（B）に模式的に示すように、シース層42のシース厚さが大きい場合には、図3に示すようにシース層42内を伝搬する表面波の波長は長くなる。このため、図7（A）に示す表面波よりも長い波長の表面波が、不連続部41で反射されるので生成される定在波44の波長も長くなり、表面波励起プラズマ45が定在波46の $1/2$

周期で密度波分布する。そのため、表面波励起プラズマ45のプラズマ密度分布は、図7（A）に示すプラズマ密度の節よりも少ない数のプラズマ密度が低い節が発生し、各節の間とマイクロ波供給口22の上端面22A近傍にプラズマ密度が極大になる極大部が発生する。

[0059] 図7（A）、及び図7（B）に示すように、成膜中に、プラズマ密度が極大になる位置とプラズマ密度が極小になる位置とが固定されると、成膜終了後の被加工材料8の処理表面に膜厚、膜硬度等の膜特性が不均一となるDLC膜が成膜されてしまう。従って、成膜中に、プラズマ密度を均一化するため、プラズマ密度が極大になる位置とプラズマ密度が極小になる位置とを変動させてDLC成膜処理されるのが望ましい。

[0060] ここで、上記図3に示すように、プラズマの電子密度が $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ において、 2.45 GHz のマイクロ波で励起されるシース厚さ約 0.4 mm のときの表面波の波長は、約 30 mm である。また、図5に示すように、このときの負のバイアス電圧は、約 -200 V （シース電位は、 -230 V ）である。一方、表面波の波長を例えば $1/4$ 波長だけ長くして約 37.5 mm とするには、図5から負のバイアス電圧は、約 -358 V （シース電位は、 -388 V ）で、図3に示すように、シース厚さは、約 0.57 mm となる。

[0061] 従って、図7に示すように、プラズマの電子密度が $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ において、負のバイアス電圧を約 -200 V から約 -358 V の間で変化させて、シース層42のシース厚さを約 0.4 mm と約 0.57 mm の間で変化させる。これにより、図8に示すように、不連続部41で反射された表面波によっ

て生成される定在波は、表面波の波長が約 30 mm のときの定在波 47 と、表面波の波長が約 37.5 mm のときの定在波 48 との間で変化する。従って、表面波励起プラズマ 45 のプラズマ密度分布が、定在波 47 と定在波 48 との間で変化するため、成膜中に、プラズマ密度が極大になる位置とプラズマ密度が極小になる位置とが変動する。よって、被加工材料 8 の処理表面に形成される DLC 膜の膜厚や膜硬度等の膜特性の均一化を図ることができる。

[0062] また、図 8 において、縦軸は、相対的な定在波強度を示し、横軸は、不連続部 41 からの距離を示す。図 8 に示すように、表面波波長を約 30 mm から約 37.5 mm までの間で変化させた場合には、表面波励起プラズマ 45 のプラズマ密度分布は、各定在波 47、48 の $1/2$ 周期で密度波分布する。そのため、定在波 47 によって生成されるプラズマ密度が極大になる各極大部の不連続部 41 からの距離は、約 7.5 mm、約 22.5 mm、約 37.5 mm、約 52.5 mm、約 67.5 mm・・・の位置に発生している。

[0063] また、定在波 48 によって生成されるプラズマ密度が極大になる各極大部の不連続部 41 からの距離は、約 10 mm、約 30 mm、約 50 mm、約 70 mm、約 90 mm・・・の位置に発生している。従って、表面波励起プラズマ 45 のプラズマ密度分布の各極大部の移動量は、不連続部 41 から離れるに従って L_1 = 約 2.5 mm、 L_2 = 約 7.5 mm、 L_3 = 約 12.5 mm、 L_4 = 約 17.5 mm、 L_5 = 約 22.5 mm、・・・となる。つまり、定在波 47 と定在波 48 との間でのプラズマ密度が極大になる位置、又は、プラズマ密度が極小になる位置の各移動量 L_1 、 L_2 、 L_3 ・・・は、不連続部 41 から離れるに従って大きくなっている。

[0064] 従って、図 6 (B) に示すように、被加工材料 8 の先端部と負電圧電極 25 との間に、被加工材料 8 と連続な形状を有し、所定長さ（例えば、長さ約 20 mm ~ 約 60 mm である。）のステンレス等で形成された導電性を有する連結部材 49 を設けるようにしてもよい。これにより、被加工材料 8 の処理表面におけるプラズマ密度分布の変化量、つまり、プラズマ密度が極大に

なる位置、又は、プラズマ密度が極小になる位置の移動量を更に大きくすることができ、被加工材料 8 の処理表面に形成される DLC 膜の膜厚や膜硬度等の膜特性の更なる均一化を図ることができる。

[0065] 次に、マイクロ波パルスと負のバイアス電圧パルスの印加タイミングの一例について図 9 に基づいて説明する。

図 9 に示すように、マイクロ波パルス 5 1 の周期は、 T_3 (秒) である。マイクロ波パルス 5 1 の 1 パルス毎の供給時間は、 T_2 (秒) であり、第 1 実施形態では、 T_2 は T_3 の約 $1/2$ に設定されている。また、負のバイアス電圧パルス 5 2 の周期は、マイクロ波パルス 5 1 の周期と同じ周期で、 T_3 (秒) である。例えば、マイクロ波パルス 5 1 と負のバイアス電圧パルス 5 2 の周期は、 $T_3 = 2$ (ミリ秒) である。

[0066] 負のバイアス電圧パルス 5 2 の印加時間は、 $(T_2 - T_1)$ (秒) であり、マイクロ波パルス 5 1 の供給時間 T_2 (秒) の 90% 以上の時間に設定されている。そして、負のバイアス電圧パルス 5 2 の印加タイミングは、マイクロ波パルス 5 1 の供給開始タイミングよりも T_1 (秒) だけ遅延するように設定されている。つまり、マイクロ波パルス 5 1 が立ち上がり、電力が安定した後に、負のバイアス電圧パルス 5 2 が印加されるように設定されている。例えば、遅延時間 $T_1 = 8$ (マイクロ秒) である。各時間 T_1 、 T_2 、 T_3 (秒) を示す情報は、ROM 3 3 又は HDD 3 4 に記憶されている。

[0067] 次に、ROM 3 3 又は HDD 3 4 に記憶されている印加電圧テーブル 5 5 の一例について図 10 に基づいて説明する。

図 10 に示すように、印加電圧テーブル 5 5 は、「順番」と、「マイクロ波出力 (kW)」と、「負のバイアス電圧 (V)」とから構成されている。この「順番」には、マイクロ波パルスを供給する順番「1」～「M」(回目) が記憶されている。

[0068] また、「マイクロ波出力 (kW)」には、マイクロ波パルス 5 1 を供給する「順番」に対応づけて、2.45 GHz のマイクロ波の出力が記憶されている。尚、第 1 実施形態では、ほぼ 1 (kW) で一定値である。また、「負

のバイアス電圧（V）」には、マイクロ波パルス51を供給する「順番」に対応づけて、負電圧電極25に印加する負のバイアス電圧パルス52の負の印加電圧値が記憶されている。つまり、シース層42のシース厚さを所定範囲の間で変化させるように設定された負のバイアス電圧パルス52の負の印加電圧値が、マイクロ波パルス51を供給する「順番」に対応づけて記憶されている。

[0069] 例えば、プラズマの電子密度が $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ において、シース層42のシース厚さを約0.4 mmから約0.57 mmの間で変化させるように、負の印加電圧値を約-200 Vから約-358 Vの間で、一定サイクル又はランダムに変化させた負の印加電圧値が、マイクロ波パルス51を供給する「順番」に対応づけて記憶されている。

[0070] [成膜処理]

次に、上記のように構成された成膜装置1のCPU31が実行する処理であって、被加工材料8の処理表面にDLC膜を成膜する成膜処理について図11乃至図13に基づいて説明する。この成膜処理は、保持具9に保持された被加工材料8が処理容器2の内部にセットされた状態で、作業者による成膜処理開始の指示が、不図示の操作部に設けられた操作ボタンを介して成膜装置1の制御部6に入力されたことをCPU31が検知することにより実行される。

[0071] 図11に示すように、まず、ステップ（以下、Sと略記する）11において、CPU31は、ROM33又はHDD34から図9に示すマイクロ波パルス51の周期 T_3 （秒）を示す情報、1パルス毎の供給時間 T_2 （秒）を示す情報を読み出し、RAM32に記憶する。例えば、マイクロ波パルス51の周期 T_3 は2（ミリ秒）であり、1パルス毎の供給時間 T_2 は1（ミリ秒）である。また、印加電圧テーブル55、及び後述するイオンクリーニングパラメータもROM33又はHDD34から読み出し、RAM32に記憶する。

[0072] また、CPU31は、ROM33又はHDD34から図9に示す負のバイ

アス電圧パルス 5 2 の周期 T_3 (秒) を示す情報、1 パルス毎の印加時間 ($T_2 - T_1$) (秒) を示す情報、マイクロ波パルス 5 1 の供給開始タイミングからの遅延時間 T_1 (秒) を示す情報を読み出し、RAM 3 2 に記憶する。例えば、負のバイアス電圧パルス 5 2 の周期 T_3 は 2 (ミリ秒) であり、1 パルス毎の印加時間 ($T_2 - T_1$) は 992 (マイクロ秒) であり、遅延時間 T_1 は 8 (マイクロ秒) である。尚、遅延時間 T_1 は、約 5 (マイクロ秒) ~ 20 (マイクロ秒) に設定されてもよい。また、各時間 T_1 、 T_2 、 T_3 (秒) は、作業者が不図示の操作部を介して成膜装置 1 の制御部 6 に入力するようにしてもよい。

[0073] そして、S 1 2 において、CPU 3 1 は、所定のパラメータを ROM 3 3 又は HDD 3 4 から読み出して、RAM 3 2 に記憶し、真空ポンプ 3 を起動させる。所定のパラメータは、イオンクリーニングパラメータ、ガス流量値等のパラメータである。これらのパラメータは、作業者により手動で設定されてもよいし、予め ROM 3 3 又は HDD 3 4 に記憶されたパラメータに基づき、自動で設定されてもよい。イオンクリーニングパラメータは、後述するイオンクリーニング処理のパラメータである。

[0074] 続いて、S 1 3 において、CPU 3 1 は、真空計 2 6 から入力される圧力信号に基づいて、処理容器 2 の内部が、所定の真空度 (例えば、1.0 Pa 未満である。) になったか否かを判定する判定処理を実行する。この所定の真空度は、予め ROM 3 3 又は HDD 3 4 に記憶されている。そして、処理容器 2 の内部が、所定の真空度に達していないと判定した場合には (S 1 3 : NO)、CPU 3 1 は、再度、S 1 3 の処理を実行する。

[0075] 一方、処理容器 2 の内部が、所定の真空度 (例えば、1.0 Pa 未満である。) に達したと判定した場合には (S 1 3 : YES)、CPU 3 1 は、S 1 4 の処理に移行する。S 1 4 において、CPU 3 1 は、イオンクリーニングパラメータである不活性ガス A_r のガス流量値 (例えば、ガス流量 200 sccm である。) を RAM 3 2 から読み出し、ガス供給部 5 に対して読み出されたガス流量値で処理容器 2 内へ不活性ガス A_r の供給をするように指

示する供給信号を出力する。つまり、不活性ガス A_r の供給が開始される。

[0076] その後、S15において、CPU31は、圧力調整バルブ7を介して処理容器2内の原料ガス及び不活性ガスを一定流量で排気するように設定し、処理容器2の内部が所定圧力になるように調整する。続いて、S16において、CPU31は、真空計26から入力される圧力信号に基づいて、処理容器2の内部が、所定の圧力に達したか否かを判定する判定処理を実行する。そして、処理容器2の内部が、所定の圧力に達していないと判定した場合には（S16：NO）、CPU31は、再度、S15以降の処理を実行する。

[0077] 一方、処理容器2の内部が、所定の圧力に達したと判定した場合には（S16：YES）、CPU31は、S17の処理に移行する。S17において、CPU31は、イオンクリーニングパラメータに基づいてイオンクリーニングを開始する。このイオンクリーニングパラメータには、マイクロ波の出力電力（例えば、800W電力である。）、負のバイアス電圧パルスの印加電圧（例えば、-200Vである。）が含まれている。

[0078] 具体的には、CPU31は、負のバイアス電圧パルスの印加電圧を負電圧電源15に送信する。CPU31は、マイクロ波の出力電力をマイクロ波電源13に送信する。CPU31は、S11で取得した負のバイアス電圧パルス52の周期 T_3 （秒）、1パルス毎の印加時間（ $T_2 - T_1$ ）（秒）、及び、マイクロ波パルス51の供給開始タイミングからの遅延時間 T_1 （秒）に基づいて、負のバイアス電圧パルス52のオン信号、及びオフ信号を負電圧パルス発生部16に送信する。CPU31は、S11で取得したマイクロ波パルス51の周期 T_3 （秒）、1パルス毎の供給時間 T_2 （秒）に基づいて、マイクロ波パルス51のオン信号、及びオフ信号をマイクロ波パルス制御部11に送信する。

[0079] この結果、負電圧電源15は、受信した印加電圧に従い、負電圧パルス発生部16に負の印加電圧を供給する。負電圧パルス発生部16は、供給された負の印加電圧と、周期 T_3 （秒）毎に受信した負のバイアス電圧パルス52のオン信号、及びオフ信号により、マイクロ波パルスの供給開始から T_1

(秒)遅延して、負のバイアス電圧パルス52を、負電圧電極25を介して被加工材料8に($T_2 - T_1$)秒間、印加する。

[0080] また、マイクロ波電源13は、受信したマイクロ波の出力電力に従い、マイクロ波発振器12に電力を供給する。マイクロ波パルス制御部11は、受信したマイクロ波パルス51のオン信号、及びオフ信号に従い、周期 T_3 (秒)毎に、供給時間 T_2 (秒)間のパルス信号をマイクロ波発振器12に送信する。マイクロ波発振器12は、周期 T_3 (秒)毎に、受信したパルス信号に従う供給時間 T_2 (秒)のマイクロ波パルス51を、供給された電力に応じた2.45GHzのマイクロ波電力で、アイソレータ17、チューナー18、導波管19、同軸導波管21及びマイクロ波供給口22を介して保持具9及び被加工材料8に向け供給する。

[0081] これにより、図7に示すように、これら負のバイアス電圧パルス52により被加工材料8の表面に沿うシース層42が、マイクロ波の伝搬する伝搬方向に対して直交する方向に、つまり、図7の横方向に拡大され、シース層42内を伝搬するマイクロ波パルス51により不活性ガスArのプラズマが発生する。この発生された不活性ガスArのプラズマにより、被加工材料8の表面がイオンクリーニングされ、後述するDLC膜が形成されやすくなる。イオンクリーニングを開始すると、CPU31は、S18の処理に移行する。

[0082] S18において、CPU31は、イオンクリーニングを終了するか否かを判定する。この判定は、アーキング発生頻度が所定の頻度未満か否かにより判定される。所定の頻度は、ROM33又はHDD34に予め記憶されている。そして、アーキング発生頻度が所定の頻度以上であると判定した場合には(S18:NO)、CPU31は、再度S18の処理を実行する。

[0083] 一方、アーキング発生頻度が所定の頻度未満であると判定した場合には(S18:YES)、CPU31は、S19の処理に移行する。尚、この終了判定は、イオンクリーニングパラメータとしてイオンクリーニング時間が設定され、CPU31は、イオンクリーニング開始からタイマ35で計測した

時間がイオンクリーニング時間を経過したか否かで判定してもよい。

- [0084] S 1 9 において、C P U 3 1 は、マイクロ波パルス制御部 1 1 にマイクロ波発振器 1 2 に送信しているパルス信号を停止するように指示する停止信号を送信する。これにより、マイクロ波発振器 1 2 は、パルス信号を受信しないため、マイクロ波パルス 5 1 の出力を停止する。また、C P U 3 1 は、負電圧パルス発生部 1 6 に負のバイアス電圧パルス 5 2 の印加を停止するように指示する停止信号を送信する。これにより、負電圧パルス発生部 1 6 は、被加工材料 8 への負のバイアス電圧パルス 5 2 の印加を停止する。
- [0085] 続いて、S 2 0 において、C P U 3 1 は、R O M 3 3 又は H D D 3 4 から原料ガス及び不活性ガスを供給するそれぞれのガス流量値を読み出し、ガス供給部 5 に流量制御指示として送信した後、S 2 1 の処理に移行する。これにより、ガス供給部 5 は、流量制御指示に従い、原料ガス及び不活性ガスを処理容器 2 の内部に供給する。尚、原料ガス及び不活性ガスを供給するそれぞれのガス流量値は、予め R O M 3 3 又は H D D 3 4 に記憶されている。例えば、不活性ガス A r は、4 0 s c c m である。C H ₄ は、2 0 0 s c c m である。C ₂ H ₂ は、0 s c c m である。T M S は、2 0 s c c m である。
- [0086] S 2 1 において、C P U 3 1 は、圧力調整バルブ 7 を介して処理容器 2 内の原料ガス及び不活性ガスを一定流量で排気するように設定し、処理容器 2 の内部が所定圧力になるように調整する。続いて、S 2 2 において、C P U 3 1 は、真空計 2 6 から入力される圧力信号に基づいて、処理容器 2 の内部が、所定の圧力に達したか否か、つまり、原料ガス及び不活性ガスの流量が安定したか否かを判定する判定処理を実行する。そして、処理容器 2 の内部が、所定の圧力に達していないと判定した場合には（S 2 2 : N O）、C P U 3 1 は、再度、S 2 1 以降の処理を実行する。
- [0087] 一方、処理容器 2 の内部が、所定の圧力に達したと判定した場合には（S 2 2 : Y E S）、C P U 3 1 は、S 2 3 において、C P U 3 1 は、R A M 3 2 から回数カウンタのカウント値 N を読み出し、このカウント値 N に「1」を代入して再度 R A M 3 2 に記憶する。つまり、C P U 3 1 は、回数カウン

タのカウント値を初期化する。同時に、CPU 31は、終了判定用タイマ36の計測時間を「0」にリセットした後、処理時間の計測を開始させる。

[0088] 続いて、S24において、CPU 31は、後述のマイクロ波パルス51の1パルス毎にシース厚さを変化させる「シース厚さ制御処理1」である図12に示すサブ処理を実行した後、S25の処理に移行する。S25において、CPU 31は、被加工材料8の表面にDLC膜を成膜する成膜処理が終了したか否かを判定する判定処理を実行する。具体的には、CPU 31は、ROM 33又はHDD 34からS24において実行する「シース厚さ制御処理1」のサブ処理の処理時間を示す情報を読み出して、終了判定用タイマ36が処理時間に達したか否かを判定する判定処理を実行する。S24において実行する「シース厚さ制御処理1」のサブ処理の処理時間は、作業者により手動で設定されてもよいし、予めROM 33又はHDD 34に記憶されたパラメータに基づき、自動で設定されてもよい。

[0089] そして、被加工材料8の表面にDLC膜を成膜する成膜処理が終了していないと判定した場合、つまり、終了判定用タイマ36の計測時間がS24において実行するサブ処理の処理時間に達していないと判定した場合には（S25：NO）、CPU 31は、再度、S24以降の処理を実行する。一方、被加工材料8の表面にDLC膜を成膜する成膜処理が終了したと判定した場合、つまり、終了判定用タイマ36の計測時間がS24において実行するサブ処理の処理時間に達したと判定した場合には（S25：YES）、CPU 31は、S26の処理に移行する。

[0090] S26において、CPU 31は、ガス供給部5に原料ガス及び不活性ガスの供給を停止するように指示する供給停止信号を送信する。また、CPU 31は、圧力調整バルブ7へ排気を全開にするように指示する排気信号を送信する。これにより、ガス供給部5は、供給停止信号に従い、処理容器2の内部への原料ガス及び不活性ガスの供給を停止する。圧力調整バルブ7は、全開となり処理容器2内に残留している原料ガス及び不活性ガスを真空ポンプ3ですみやかに排気する。その後、CPU 31は、処理を終了する。

[0091] [シース厚さ制御処理 1]

次に、上記 S 2 4 で C P U 3 1 が実行する「シース厚さ制御処理 1」であるサブ処理について図 1 2 及び図 1 3 に基づいて説明する。

図 1 2 に示すように、まず、S 1 1 1 において、C P U 3 1 は、タイマ 3 5 の計測時間を「0」にリセットし、成膜時間の計測を開始する。そして、S 1 1 2 において、C P U 3 1 は、回数カウンタのカウント値 N を、図 1 0 に示す印加電圧テーブル 5 5 の「順番」とし、この「順番」に対応づけられた「マイクロ波出力 (kW)」を印加電圧テーブル 5 5 から読み出す。

[0092] そして、C P U 3 1 は、このマイクロ波の出力電力をマイクロ波電源 1 3 に送信する。C P U 3 1 は、マイクロ波パルスオン信号をマイクロ波パルス制御部 1 1 に送信する。この結果、マイクロ波電源 1 3 は、受信したマイクロ波の出力電力に従い、マイクロ波発振器 1 2 に電力を供給する、即ち、マイクロ波発振器 1 2 におけるマグネトロンに印加される印加電圧やアノード電流を供給する。マイクロ波パルス制御部 1 1 は、受信した供給時間 T 2 (秒) を示す情報に従い、後述する S 1 1 6 の処理と合わせて供給時間 T 2 (秒) 間となるパルス信号をマイクロ波発振器 1 2 に向け送信開始する。

[0093] マイクロ波発振器 1 2 は、供給された電力で、供給時間 T 2 (秒) の 2.45 GHz のマイクロ波パルス 5 1 を、アイソレータ 1 7、チューナー 1 8、導波管 1 9、同軸導波管 2 1 及びマイクロ波供給口 2 2 を介して保持具 9 及び被加工材料 8 へ向け供給開始する。

[0094] 続いて、S 1 1 3 において、C P U 3 1 は、タイマ 3 5 の計測時間が遅延時間 T 1 (秒) になったか否か、つまり、負のバイアス電圧パルス 5 2 の印加タイミングになったか否かを判定する判定処理を実行する。そして、タイマ 3 5 の計測時間が遅延時間 T 1 (秒) に達していないと判定した場合には (S 1 1 3 : NO)、C P U 3 1 は、再度 S 1 1 3 の処理を実行する。

[0095] 一方、タイマ 3 5 の計測時間が遅延時間 T 1 (秒) に達したと判定した場合には (S 1 1 3 : YES)、C P U 3 1 は、S 1 1 4 の処理に移行する。S 1 1 4 において、C P U 3 1 は、回数カウンタのカウント値 N を図 1 0 に

示す印加電圧テーブル 55 の「順番」とし、この「順番」に対応づけられた「負のバイアス電圧 (V)」の負のバイアス電圧パルスの印加電圧を印加電圧テーブル 55 から読み出す。

[0096] そして、CPU 31 は、この負のバイアス電圧パルスの印加電圧を負電圧電源 15 に送信する。CPU 31 は、負のバイアス電圧パルスオン信号を負電圧パルス発生部 16 に送信する。この結果、負電圧電源 15 は、受信した印加電圧に従い、負電圧パルス発生部 16 に負電圧を供給する。負電圧パルス発生部 16 は、供給された負の印加電圧で、後述する S 116 の処理と合わせて印加時間 ($T_2 - T_1$) (秒) となる負のバイアス電圧パルス 52 を、負電圧電極 25 を介して被加工材料 8 への印加を開始する。

[0097] 続いて、S 115 において、CPU 31 は、タイマ 35 の計測時間が、マイクロ波パルス 51 の供給時間 T_2 (秒) になったか否かを判定する判定処理を実行する。そして、タイマ 35 の計測時間が、マイクロ波パルス 51 の供給時間 T_2 (秒) に達していないと判定した場合には (S 115 : NO)、CPU 31 は、再度 S 115 の処理を実行する。一方、タイマ 35 の計測時間が、マイクロ波パルス 51 の供給時間 T_2 (秒) に達したと判定した場合には (S 115 : YES)、CPU 31 は、S 116 の処理に移行する。

[0098] S 116 において、CPU 31 は、マイクロ波パルス制御部 11 にマイクロ波発振器 12 に送信しているパルス信号を停止するように指示するマイクロ波パルスオフ信号を送信する。これにより、マイクロ波発振器 12 は、パルス信号を受信しないため、マイクロ波パルス 51 の出力を停止する。また、CPU 31 は、負電圧パルス発生部 16 に負のバイアス電圧パルス 52 の印加を停止するように指示する負のバイアス電圧パルスオフ信号を送信する。これにより、負電圧パルス発生部 16 は、被加工材料 8 への負のバイアス電圧パルス 52 の印加を停止する。

[0099] 続いて、S 117 において、CPU 31 は、タイマ 35 の計測時間が、マイクロ波パルス 51 の周期 T_3 (秒) になったか否かを判定する判定処理を実行する。そして、タイマ 35 の計測時間が、マイクロ波パルス 51 の周期

T 3（秒）に達していないと判定した場合には（S 1 1 7 : N O）、C P U 3 1 は、再度 S 1 1 7 の処理を実行する。一方、タイマ 3 5 の計測時間が、マイクロ波パルス 5 1 の周期 T 3（秒）に達したと判定した場合には（S 1 1 7 : Y E S）、C P U 3 1 は、S 1 1 8 の処理に移行する。

[0100] S 1 1 8 において、C P U 3 1 は、回数カウンタのカウント値 N が、印加電圧テーブル 5 5 の「順番」の最終回数である「M」に達したか否かを判定する判定処理を実行する。そして、回数カウンタのカウント値 N が、この「M」に達していないと判定した場合には（S 1 1 8 : N O）、C P U 3 1 は、S 1 1 9 の処理に移行する。S 1 1 9 において、C P U 3 1 は、回数カウンタのカウント値 N に「1」加算した後、サブ処理を終了して、メインフローチャートに戻り、S 2 5 の処理に移行する。

[0101] 一方、回数カウンタのカウント値 N が、印加電圧テーブル 5 5 の「順番」の最終回数である「M」に達したと判定した場合には（S 1 1 8 : Y E S）、C P U 3 1 は、S 1 2 0 の処理に移行する。S 1 2 0 において、C P U 3 1 は、回数カウンタのカウント値 N に「1」を代入して、初期化した後、サブ処理を終了して、メインフローチャートに戻り、S 2 5 の処理に移行する。

[0102] ここで、処理容器 2 の内部のプラズマの電子密度が $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ において、シース層 4 2 のシース厚さを約 0.4 mm から約 0.57 mm の間で変化させて成膜した「シース厚さ制御処理 1」の一例を図 1 3 に基づいて説明する。

図 1 3 に示すように、マイクロ波の出力電力が約 1 kW 電力の各マイクロ波パルス 5 1 の 1 パルス供給毎に、負の印加電圧が -358 V（シース電位は、-388 V）の負のバイアス電圧パルス 5 2 A、負の印加電圧が -279 V（シース電位は、-309 V）の負のバイアス電圧パルス 5 2 B、負の印加電圧が -200 V（シース電位は、-230 V）の負のバイアス電圧パルス 5 2 C、負の印加電圧が -279 V の負のバイアス電圧パルス 5 2 D を順番に繰り返し被加工材料 8 に印加する。

- [0103] この結果、被加工材料 8 の表面に生成されるシース層 4 2 のシース厚さは、マイクロ波の出力電力が約 1 kW 電力の各マイクロ波パルス 5 1 の 1 パルス供給毎に、約 0.57 mm、約 0.49 mm、約 0.4 mm、約 0.49 mm の順番に繰り返し変化させることができる。これにより、シース層 4 2 内を伝搬する表面波の波長が、約 37.5 mm、約 33.8 mm、約 30 mm、約 33.8 mm と順番に繰り返し変化する。
- [0104] 従って、表面波の各波長毎に定在波が変化して、表面波励起プラズマ 4 5 のプラズマ密度分布が、各定在波毎に変化する。即ち、被加工材料 8 の長手方向、すなわちマイクロ波の供給方向において、プラズマ密度が高くなる位置、低くなる位置が順次変化しプラズマ密度が平均化されるので、被加工材料 8 の長手方向のプラズマ密度分布の均一性が向上する。このため、被加工材料 8 の処理表面に形成される DLC 膜の膜厚や膜硬度等の膜特性の均一化を図ることができる。
- [0105] 以上詳細に説明した通り、第 1 実施形態に係る成膜装置 1 では、CPU 3 1 は、マイクロ波パルス 5 1 の供給中に、負のバイアス電圧パルス 5 2 を負電圧電極 2 5 を介して被加工材料 8 に印加してシース層 4 2 を生成する。また、マイクロ波パルス 5 1 の 1 パルス毎に、負のバイアス電圧パルス 5 2 の印加電圧を変化させることによって、シース層 4 2 のシース厚さを変化させ、シース層 4 2 内を高エネルギー密度の表面波として伝搬するマイクロ波によって生成される定在波の分布を変化させることができる。
- [0106] これにより、表面波によってプラズマ励起された原料ガスの高密度プラズマのプラズマ密度の定在波分布を変化させることができ、被加工材料 8 の長手方向すなわちシース層 4 2 内を伝搬する表面波の伝搬方向に対するプラズマ密度が平均化、均一化されるので、被加工材料 8 の表面に形成された DLC 膜の膜厚、膜硬度等の膜特性を均一化することができる。尚、シース層 4 2 のシース厚さを変化させて、シース層 4 2 内を伝搬する表面波の波長を、 $1/4$ 波長以上変化させることによって、被加工材料 8 の表面に形成された DLC 膜の膜厚、膜硬度等の膜特性を更に均一化することができる。

[0107] また、マイクロ波パルス 5 1 の 1 パルス毎に、負の印加電圧の異なる複数種類のパルス状の負のバイアス電圧パルス 5 2 を順次印加して、シース厚さの拡大と減縮を繰り返す。これにより、シース層 4 2 内を高エネルギー密度の表面波として伝搬するマイクロ波によって生成される定在波の分布を固定せず、絶えず変化させることにより平均化されたプラズマ密度分布を均一化することができ、被加工材料の表面に形成された D L C 膜の膜厚、膜硬度等の膜特性の更なる均一化を図ることができる。

[0108] また、マイクロ波パルス 5 1 の供給中に、被加工材料 8 に印加される負のバイアス電圧パルス 5 2 の負の印加電圧を変化させてシース厚さを変化させるため、シース層 4 2 のシース厚さを高速に変化させることができる。これにより、シース層 4 2 内を高エネルギー密度の表面波として伝搬するマイクロ波によって生成される定在波の分布変化を高速に行い、M V P 法による高速成膜への追従性の向上を図ることができる。即ち、M V P 法では $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 程度の D L C 膜を成膜するのに数 10 秒程度の処理時間となる。この間にシース層 4 2 の厚さを高速に変化させることができる。

[0109] [第 2 実施形態]

次に、第 2 実施形態に係る成膜装置 6 1 について図 1 4 乃至図 1 6 に基づいて説明する。尚、以下の説明において上記図 1 乃至図 1 3 の第 1 実施形態に係る成膜装置 1 の構成等と同一符号は、第 1 実施形態に係る成膜装置 1 の構成等と同一あるいは相当部分を示すものである。尚、図 1 6 において、表面波励起プラズマ 6 6 の輪郭は定在波の影響により、実際には、波打つ形状になる。また、実際の表面波励起プラズマ 6 6 の大きさは、図 1 6 に示す表面波励起プラズマ 6 6 の大きさとは限らない。

[0110] 第 2 実施形態に係る成膜装置 6 1 の概略構成は、第 1 実施形態に係る成膜装置 1 とほぼ同じ構成である。

但し、図 9 に示されるマイクロ波パルス 5 1 と負のバイアス電圧パルス 5 2 の印加タイミングに替えて、図 1 4 に示されるマイクロ波パルス 5 1 と負のバイアス電圧パルス 6 2 の印加タイミングが、R O M 3 3 又は H D D 3 4

に記憶されている。また、図 10 に示される印加電圧テーブル 55 に替えて、図 14 に示される負のバイアス電圧パルス 62 の「0 V」である初期印加電圧 V A、負のシース層初期拡大印加電圧 V B、負のシース層通常拡大印加電圧 V C が、ROM 33 又は HDD 34 に記憶されている。つまり、負のバイアス電圧パルス 62 の 1 パルス毎の印加電圧波形は、ほぼ同じ波形である。

[0111] 負のシース層初期拡大印加電圧 V B は、負のシース層をマイクロ波供給口 22 の周縁部から被加工材料 8 の全体にわたって伸長させて拡大させるための電圧である。負のシース層通常拡大印加電圧 V C は、被加工材料 8 の全体にわたって伸長させた負のシース層を拡大、および維持させるための電圧である。従って、負のシース層初期拡大印加電圧 V B は、マイクロ波供給口 22 の周縁部に生成したシース層を、被加工材料 8 の全体にわたって伸長させるため、負のシース層通常拡大印加電圧 V C よりも大きい。

[0112] ここで、負のシース層初期拡大印加電圧 V B は、負のシース層通常拡大印加電圧 V C より大きい印加電圧に設定されている。例えば、負のシース層初期拡大印加電圧 V B = -400 V（シース電位は、-430 V）であり、負のシース層通常拡大印加電圧 V C = -200 V（シース電位は、-230 V）である。また、上記「成膜処理」の S24 において、CPU 31 は、図 12 に示される「シース厚さ制御処理 1」のサブ処理に替えて、図 15 に示される「シース厚さ制御処理 2」のサブ処理を実行する。

[0113] 先ず、マイクロ波パルス 51 と負のバイアス電圧パルス 62 の印加タイミングについて図 14 に基づいて説明する。

図 14 に示すように、マイクロ波パルス 51 は、第 1 実施形態に係る成膜装置 1 のマイクロ波パルス 51 と同じパルス波形である。また、負のバイアス電圧パルス 62 の周期は、マイクロ波パルス 51 の周期と同じ周期である。

[0114] 負のバイアス電圧パルス 62 の印加タイミングは、第 1 実施形態に係る成膜装置 1 の負のバイアス電圧パルス 52 の印加タイミングと同じである。続

いて、負のバイアス電圧パルス 6 2 は、印加時間 ($T_{11} - T_1$) の間は、負のシース層初期拡大印加電圧 V_B が印加される。例えば、負のシース層初期拡大印加電圧 V_B の印加時間 ($T_{11} - T_1$) は 10 (マイクロ秒) である。

[0115] そして、負のバイアス電圧パルス 6 2 は、印加時間 ($T_2 - T_{11}$) の間は、負のシース層通常拡大印加電圧 V_C が印加される。また、負のシース層通常拡大印加電圧 V_C の印加時間 ($T_2 - T_{11}$) は、マイクロ波パルス 5 1 の供給時間 T_2 (秒) の 90% 以上の時間である。例えば、負のシース層通常拡大印加電圧 V_C の印加時間 ($T_2 - T_{11}$) は 982 (マイクロ秒) である。つまり、マイクロ波パルス 5 1 の 1 パルス内において、負のバイアス電圧パルス 6 2 は、「0 V」である負の印加電圧 V_A 、負のシース層初期拡大印加電圧 V_B 、負のシース層通常拡大印加電圧 V_C の順番に電圧値が変化する。

[0116] 従って、マイクロ波パルス 5 1 の印加タイミングに加えて、負のバイアス電圧パルス 6 2 の遅延時間 T_1 (秒)、負のシース層初期拡大印加電圧 V_B の印加時間 ($T_{11} - T_1$) (秒)、負のシース層通常拡大印加電圧 V_C の印加開始時間 T_{11} (秒)、負のシース層通常拡大印加電圧 V_C の印加時間 ($T_2 - T_{11}$) (秒)、負のシース層通常拡大印加電圧 V_C の印加終了時間 T_2 (秒) が、ROM 33 又は HDD 34 に記憶されている。このため、第 2 実施形態に係る成膜装置 6 1 では、上記 S 11 において、ROM 33 又は HDD 34 から「0 V」である初期印加電圧 V_A 、負のシース層初期拡大印加電圧 V_B 、負のシース層通常拡大印加電圧 V_C を読み出し、RAM 32 に記憶する。

[0117] [シース厚さ制御処理 2]

次に、上記 S 24 で CPU 31 が実行する「シース厚さ制御処理 2」のサブ処理について図 14 乃至図 16 に基づいて説明する。

図 15 に示すように、まず、S 211 において、CPU 31 は、上記 S 11 の処理を実行する。そして、S 212 において、CPU 31 は、マイク

口波の出力電力 P_1 (kW) をROM 33又はHDD 34から読み出し、このマイクロ波の出力電力 P_1 (kW) を、印加電圧テーブル55から読み出した「マイクロ波出力 (kW)」として、上記S 112の処理を実行する。また、CPU 31は、負のバイアス電圧パルス62の「0V」である初期印加電圧 V_A をRAM 32から読み出し、初期印加電圧 V_A を負電圧電源15に送信する。

[0118] 負電圧電源15は、受信した「0V」である初期印加電圧 V_A に従い、負電圧パルス発生部16に0 (V) を供給する。負電圧パルス発生部16は、電圧0 (V) を、負電圧電極25を介して被加工材料8への印加を開始する。従って、供給開始されたマイクロ波パルス51により図16の左端に示すように、処理容器2内のマイクロ波供給口22の周縁部に原料ガス及び不活性ガスのプラズマが点火された場合は、図14に示すように、被加工材料8及び保持具9の表面にシース厚さ D_1 (mm) のシース層が形成される。例えば、シース厚さ $D_1 = 0.07$ mmであり拡大されていないので、マイクロ波は表面波としてシース層内を伝搬しない。尚、図16において、プラズマ63はプラズマの発生する位置のみを示し、定在波を示していない。実際には定在波に応じてプラズマの密度分布が生じる。

[0119] 続いて、S 213において、CPU 31は、上記S 113の処理を実行する。そして、タイマ35の計測時間が遅延時間 T_1 (秒) に達したと判定した場合には (S 213: YES)、CPU 31は、S 214の処理に移行する。S 214において、CPU 31は、負のシース層初期拡大印加電圧 V_B をRAM 32から読み出し、この負のシース層初期拡大印加電圧 V_B を負電圧電源15に送信する。CPU 31は、負のバイアス電圧パルスオン信号を負電圧パルス発生部16に送信する。例えば、負のシース層初期拡大印加電圧 $V_B = -400$ V (シース電位は、 -430 V) であり、印加時間 ($T_1 - T_1$) = 10 (マイクロ秒) である。また、マイクロ波発振器12からマイクロ波パルス51の供給は継続されている。

[0120] この結果、負電圧電源15は、受信した負のシース層初期拡大印加電圧 V

Bに従い、負電圧パルス発生部16に負のシース層初期拡大印加電圧 V_B を供給する。負電圧パルス発生部16は、供給された負のシース層初期拡大印加電圧 V_B で、後述するS216の処理と合わせて印加時間 $(T_{11} - T_1)$ (秒)となる負のバイアス電圧パルス62を、負電圧電極25を介して被加工材料8への印加を開始する。

[0121] 従って、図14に示すように、被加工材料8及び保持具9の表面にシース厚さ D_2 (mm)のシース層が形成される。例えば、シース厚さ $D_2 = 0.57$ mmである。また同時に、図16の中央に示すように、被加工材料8及び保持具9の表面に形成され拡大されたシース層65内をマイクロ波が表面波として伝搬して、被加工材料8及び保持具9の表面に沿って高密度プラズマである表面波励起プラズマ66が発生する。即ち、シース層65が十分拡大され、マイクロ波が表面波として伝搬し易くなるので、すみやかに被加工材料8の先端に向け安定した高密度プラズマが生成される。これにより、被加工材料8の表面にDLC膜の成膜も始まる。

[0122] 続いて、S215において、CPU31は、タイマ35の計測時間が負のシース層通常拡大印加電圧 V_C の印加開始時間 T_{11} (秒)になったか否か、つまり、負のシース層通常拡大印加電圧 V_C の印加タイミングになったか否かを判定する判定処理を実行する。そして、タイマ35の計測時間が負のシース層通常拡大印加電圧 V_C の印加開始時間 T_{11} (秒)に達していないと判定した場合には(S215:NO)、CPU31は、再度S215の処理を実行する。

[0123] 一方、タイマ35の計測時間が負のシース層通常拡大印加電圧 V_C の印加開始時間 T_{11} (秒)に達したと判定した場合には(S215:YES)、CPU31は、S216の処理に移行する。S216において、CPU31は、負のシース層通常拡大印加電圧 V_C をRAM32から読み出して、負電圧電源15に送信する。CPU31は、負のバイアス電圧パルスオン信号を負電圧パルス発生部16に送信する。例えば、負のシース層通常拡大印加電圧 $V_C = -200$ V(シース電位は、 -230 V)であり、印加時間 $(T_2$

ー T_{11})は982(マイクロ秒)である。また、マイクロ波発振器12からマイクロ波パルス51の供給は継続されている。

[0124] この結果、負電圧電源15は、受信した負のシース層通常拡大印加電圧 V_C に従い、負電圧パルス発生部16に負のシース層通常拡大印加電圧 V_C を供給する。負電圧パルス発生部16は、供給された負のシース層通常拡大印加電圧 V_C で、後述するS218の処理と合わせ印加時間($T_2 - T_{11}$)(秒)となる負のバイアス電圧パルス62を、負電圧電極25を介して被加工材料8へ印加する。

[0125] 従って、図14に示すように、被加工材料8及び保持具9の表面にシース厚さ D_3 (mm)のシース層が形成される。例えば、シース厚さ $D_3 = 0.4$ mmである。また同時に、図16の右端に示すように、被加工材料8及び保持具9の表面に形成されたシース層67内をマイクロ波が表面波として伝搬して、被加工材料8及び保持具9の表面に沿って高密度プラズマである表面波励起プラズマ66が発生する。これにより、被加工材料8の表面にDLC膜が成膜される。

[0126] 続いて、S217において、CPU31は、上記S115の処理を実行する。そして、タイマ35の計測時間が、マイクロ波パルス51の供給時間 T_2 (秒)に達したと判定した場合には(S217: YES)、CPU31は、S218の処理に移行する。S218において、CPU31は、上記S116の処理を実行する。続いて、S219において、CPU31は、上記S117の処理を実行する。そして、タイマ35の計測時間が、マイクロ波パルス51の周期 T_3 (秒)に達したと判定した場合には(S219: YES)、CPU31は、S220の処理に移行する。

[0127] S220において、CPU31は、ROM33又はHDD34から合計印加回数 M を読み出し、回数カウンタのカウント値 N が、合計印加回数 M に達したか否かを判定する判定処理を実行する。そして、回数カウンタのカウント値 N が、合計印加回数 M に達していないと判定した場合には(S220: NO)、CPU31は、S221の処理に移行する。S221において、C

P U 3 1 は、上記 S 1 1 9 の処理を実行する。一方、回数カウンタのカウント値 N が、合計印加回数 M に達したと判定した場合には (S 2 2 0 : Y E S) 、 C P U 3 1 は、 S 2 2 2 の処理に移行する。 S 2 2 2 において、 C P U 3 1 は、上記 S 1 2 0 の処理を実行する。

[0128] 尚、 S 2 1 9 において、 C P U 3 1 は、タイマ 3 5 の計測時間が、マイクロ波パルス 5 1 の周期 T 3 (秒) に達したと判定した場合には (S 2 1 9 : Y E S) 、 S 2 2 0 乃至 S 2 2 2 の処理を実行することなく、サブ処理を終了してメインフローチャートに戻り、 S 2 5 の処理に移行するようにしてもよい。

[0129] 以上詳細に説明した通り、第 2 実施形態に係る成膜装置 6 1 では、 C P U 3 1 は、マイクロ波パルス 5 1 の 1 パルス毎の供給時間 T 2 (秒) 内において、負のバイアス電圧パルス 6 2 を、「 0 V 」である負の印加電圧 V A 、負のシース層初期拡大印加電圧 V B 、負のシース層通常拡大印加電圧 V C の順番に、それぞれ遅延時間 T 1 (秒)、印加時間 (T 1 1 - T 1) (秒)、印加時間 (T 2 - T 1 1) (秒) で変化させる。

[0130] これにより、プラズマ供給口 2 2 の周辺にプラズマを発生させた後、負のシース層初期拡大印加電圧 V B を被加工材料 8 に印加することによって、シース厚さの大きいシース層 6 5 を生成して、表面波励起プラズマを高速で伸長させることができる。その後、負のシース層通常拡大印加電圧 V C を被加工材料 8 に印加することによって、被加工材料 8 の表面に所定厚さのシース層 6 7 を生成して、表面波励起プラズマ 6 6 を安定的に発生させることができる。従って、プラズマの不安定化による膜厚、膜硬度等の膜特性の変動が生じず、被加工材料 8 の表面に形成された D L C 膜の膜厚、膜硬度等の膜特性を均一化することができる。また、表面波励起プラズマを被加工材料 8 の表面に沿って高速で伸長させることができ、 M V P 法による高速成膜への追従性の向上を図ることができる。

[0131] [第 3 実施形態]

次に、第 3 実施形態に係る成膜装置 7 1 について図 1 7 乃至図 1 9 に基づ

いて説明する。尚、以下の説明において上記図 1 乃至図 13 の第 1 実施形態に係る成膜装置 1 の構成等と同一符号は、第 1 実施形態に係る成膜装置 1 の構成等と同一あるいは相当部分を示すものである。

[0132] 第 3 実施形態に係る成膜装置 71 の概略構成は、第 1 実施形態に係る成膜装置 1 とほぼ同じ構成である。

但し、図 17 に示すように、図 10 に示される印加電圧テーブル 55 の「負のバイアス電圧 (V)」には、マイクロ波パルス 51 を供給する「順番」に対応づけて、シース層 42 のシース厚さを所定の範囲で徐々に大きくするように設定された負のバイアス電圧パルス 72A、72B、72C、・・・の負の印加電圧値が記憶されている。また、各バイアス電圧パルス 72A、72B、72C、・・・の負の印加電圧値は連続的に変化するように、各負の印加電圧値は、初期電圧 VD から最終電圧 VE まで徐々に大きくなるように設定されている。

[0133] 例えば、プラズマの電子密度が $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ において、シース層 42 のシース厚さを約 0.4 mm から約 0.57 mm まで徐々に大きくなるように、負の印加電圧の初期電圧 VD と最終電圧 VE を約 -200 V (シース電位は、-230 V) から約 -358 V (シース電位は、-388 V) まで印加毎に徐々に大きくなるように設定された負の印加電圧が、マイクロ波パルス 51 を供給する「順番」に対応づけて記憶されている。

[0134] 従って、CPU 31 が上記「成膜処理」の S24 において、「シース厚さ制御処理 1」のサブ処理を実行することによって、上記 S114 において、負電圧電極 25 を介して被加工材料 8 への印加される負の印加電圧の絶対値は、印加毎に徐々に大きくなる共に、印加中も徐々に大きくなる。そのため、被加工材料 8 の表面に形成されるシース層 42 のシース厚さは、負の印加電圧の印加毎に徐々に大きくなる共に、印加中も徐々に大きくなって、被加工材料 8 の表面に DLC 膜が成膜される。

[0135] このようにして成膜された DLC 膜 73 内の膜硬度の変化について図 18 及び図 19 に基づいて説明する。図 18 及び図 19 に示すように、被加工材

料 8 の表面に成膜された D L C 膜 7 3 内の膜硬度は、被加工材料 8 の表面から膜厚方向外側へ離れるに従って徐々に高くなっている。つまり、成膜された D L C 膜 7 3 内の膜硬度は、被加工材料 8 の表面に形成されたシース層 4 2 のシース厚さが大きくなるに従って徐々に高くなっている。

[0136] 以上詳細に説明した通り、第 3 実施形態に係る成膜装置 7 1 では、C P U 3 1 が、マイクロ波パルス 5 1 を 1 パルス供給する「順番」に対応づけて、シース層 4 2 のシース厚さを所定の範囲で徐々に大きくするように、負のバイアス電圧パルス 7 2 A、7 2 B、7 2 C、・・・の負の印加電圧の絶対値を徐々に大きくなるように設定する。これにより、被加工材料 8 の表面に形成された D L C 膜 7 3 内の膜硬度が、膜厚方向外側へ離れるに従って徐々に高くなるようにすることができる。

[0137] また、D L C 膜 7 3 の被加工材料 8 と接する下層部分は、小さい負の印加電圧で成膜されているため、この小さい負の印加電圧により成膜される膜の膜硬度が低くなり、被加工材料 8 の硬度との硬度差が小さくなる。この結果、D L C 膜 7 3 の被加工材料 8 への密着性を高めることができる。また、各負のバイアス電圧パルス 7 2 A、7 2 B、7 2 C、・・・の 1 パルス内でも負の印加電圧が徐々に大きくなっているため、被加工材料 8 の表面に形成された D L C 膜 7 3 内の膜硬度を、後述の第 4 実施形態に係る成膜装置 8 1 にて成膜される D L C 膜よりも膜厚方向外側へ連続的に高くすることができる。また、第 3 実施形態においては、1 パルス内で、電圧値が異なるため、この 1 パルスにより成膜される膜の硬度差が小さくなる。従って、このパルスが複数印加された場合に、より密着性が高い膜を被加工材料 8 に成膜できる。

[0138] 尚、C P U 3 1 が、マイクロ波パルス 5 1 を 1 パルス供給する「順番」に対応づけて、シース層 4 2 のシース厚さを所定の範囲で徐々に小さくするように、負のバイアス電圧パルス 7 2 A、7 2 B、7 2 C、・・・の負の印加電圧の絶対値を徐々に低くなるように設定するようにしてもよい。これにより、被加工材料 8 の表面に形成された D L C 膜 7 3 内の膜硬度が、膜厚方向

外側へ離れるに従って徐々に低くなるようにすることができ、被加工材料 8 の表面に形成された D L C 膜 7 3 の摺動する接触部材へのなじみの向上を図ることができる。

[0139] [第 4 実施形態]

次に、第 4 実施形態に係る成膜装置 8 1 について図 2 0 及び図 2 1 に基づいて説明する。尚、以下の説明において上記第 3 実施形態に係る成膜装置 7 1 の構成等と同一符号は、第 3 実施形態に係る成膜装置 7 1 の構成等と同一あるいは相当部分を示すものである。

第 4 実施形態に係る成膜装置 8 1 の概略構成は、第 3 実施形態に係る成膜装置 7 1 とほぼ同じ構成である。

[0140] 但し、図 2 0 に示すように、図 1 0 に示される印加電圧テーブル 5 5 の「負のバイアス電圧 (V)」には、マイクロ波パルス 5 1 を 1 パルス供給する「順番」に対応づけて、シース層 4 2 のシース厚さを所定の範囲で徐々に大きくするように設定された負のバイアス電圧パルス 8 2 A、8 2 B、8 2 C、・・・の負の印加電圧値が記憶されている。各バイアス電圧パルス 8 2 A、8 2 B、8 2 C、・・・の負の印加電圧は、段階的に変化するように、各負の印加電圧は、初期電圧 V D から最終電圧 V E まで一定電圧なるように設定されている。

[0141] 従って、C P U 3 1 が上記「成膜処理」の S 2 2 において、「シース厚さ制御処理 1」のサブ処理を実行することによって、上記 S 1 1 4 において、負電圧電極 2 5 を介して被加工材料 8 への印加される負の印加電圧の絶対値は、印加毎に徐々に大きくなる。そのため、被加工材料 8 の表面に形成されるシース層 4 2 のシース厚さは、負の印加電圧の印加毎に徐々に大きくなって、D L C 膜が成膜される。これにより、第 4 実施形態に係る成膜装置 8 1 では、第 3 実施形態に係る成膜装置 7 1 と同様に、被加工材料 8 の表面に形成された D L C 膜 7 3 内の膜硬度が、膜厚方向外側へ離れるに従って徐々に高くなるようにすることができ、D L C 膜 7 3 の被加工材料 8 への密着性を高めることができる。

[0142] 尚、図 21 に示すように、CPU 31 は、被加工材料 8 への印加される負のバイアス電圧を、例えば、2 パルス毎に大きくしてもよい。即ち、被加工材料 8 への印加される負の印加電圧は複数のパルス毎に大きくなってもよい。

[0143] [第 5 実施形態]

次に、第 5 実施形態に係る成膜装置 91 について図 22 に基づいて説明する。尚、以下の説明において上記第 3 実施形態に係る成膜装置 71 の構成等と同一符号は、第 3 実施形態に係る成膜装置 71 の構成等と同一あるいは相当部分を示すものである。

第 5 実施形態に係る成膜装置 91 の概略構成は、第 3 実施形態に係る成膜装置 71 とほぼ同じ構成である。

[0144] 但し、図 22 に示すように、図 10 に示される印加電圧テーブル 55 の「負のバイアス電圧 (V)」には、マイクロ波パルス 51 を 1 パルス供給する「順番」に対応づけて、シース層 42 のシース厚さを所定の範囲で徐々に大きくするように設定された負のバイアス電圧パルス 72 A、72 B、72 C、・・・の負の印加電圧であるシース層通常拡大印加電圧が記憶されている。また、マイクロ波パルス 51 を供給する「順番」に対応づけて、各バイアス電圧パルス 72 A、72 B、72 C、・・・の印加開始前に印加時間 T22 (秒) で印加される負のシース層初期拡大印加電圧 VQ が記憶されている。例えば、印加時間 T22 = 10 (マイクロ秒) であり、負のシース層初期拡大印加電圧 VQ は -400 V (シース電位は、-430 V) である。

[0145] 従って、図 22 に示すように、CPU 31 が上記「成膜処理」の S24 において、「シース厚さ制御処理 1」のサブ処理を実行することによって、上記 S114 において、負電圧電極 25 を介して被加工材料 8 への印加される負のバイアス電圧パルスは、印加毎に負のシース層初期拡大印加電圧 VQ のシース層初期拡大印加電圧パルス 92 が印加時間 T22 (秒) 間印加された後、徐々に大きくなる各バイアス電圧パルス 72 A、72 B、72 C、・・・のシース層通常拡大印加電圧が印加される。そのため、シース層初期拡大

印加電圧パルス 92 の被加工材料 8 への印加によって、被加工材料 8 の表面に沿って生成されたシース層 42 により、プラズマを高速で伸長させた後、徐々に大きくなる各バイアス電圧パルス 72A、72B、72C、・・・のシース層通常拡大印加電圧が印加される。

[0146] これにより、第 5 実施形態に係る成膜装置 91 では、第 3 実施形態に係る成膜装置 71 と同様に、被加工材料 8 の表面に形成された DLC 膜 73 内の膜硬度が、膜厚方向外側へ離れるに従って徐々に高くなるようにすることができ、DLC 膜 73 の被加工材料 8 への密着性を高めることができる。また、表面波励起プラズマを被加工材料 8 の表面に沿って高速で安定して伸長させることができ、MVP 法による高速成膜への更なる追従性の向上を図ることができる。

[0147] [第 6 実施形態]

次に、第 6 実施形態に係る成膜装置 95 について図 23 及び図 24 に基づいて説明する。尚、以下の説明において上記図 1 乃至図 13 の第 1 実施形態に係る成膜装置 1 の構成等と同一符号は、第 1 実施形態に係る成膜装置 1 の構成等と同一あるいは相当部分を示すものである。

[0148] 第 6 実施形態に係る成膜装置 95 の概略構成は、第 1 実施形態に係る成膜装置 1 とほぼ同じ構成である。

但し、図 23 に示すように、図 10 に示される印加電圧テーブル 55 の「負のバイアス電圧 (V)」には、マイクロ波パルス 51 を供給する「順番」に対応づけて、負電圧電極 25 に印加する負のバイアス電圧パルス 96 の負の印加電圧 V_K と、負電圧電極 25 に印加する負のバイアス電圧パルス 97 の負の印加電圧 V_L よりも絶対値が大きい負の印加電圧 V_L が、マイクロ波パルス 51 の供給回数の複数回、例えば 4 回毎に、交互に繰り返し記憶されている。例えば、負の印加電圧 $V_K = -200V$ (シース電位は、 $-230V$) であり、負の印加電圧 $V_L = -400V$ (シース電位は、 $-430V$) である。

[0149] 従って、図 23 に示すように、CPU 31 が上記「成膜処理」の S24 に

において、「シース厚さ制御処理 1」のサブ処理を実行することによって、上記 S 1 1 4 において、負電圧電極 2 5 を介して被加工材料 8 への印加される負のバイアス電圧パルスは、マイクロ波パルス 5 1 の供給回数の複数回、例えば 4 回毎に、負の印加電圧 V_K の負のバイアス電圧パルス 9 6 と、負の印加電圧 V_L の負のバイアス電圧パルス 9 7 とが、交互に繰り返し印加される。そのため、被加工材料 8 の表面に形成されるシース層 4 2 のシース厚さは、マイクロ波パルス 5 1 の供給回数の複数回、例えば 4 回毎に、シース厚さの小さいシース層 4 2 とシース厚さの大きいシース層 4 2 とが交互に繰り返し形成されて、被加工材料 8 の表面に D L C 膜が成膜される。

[0150] ここで、被加工材料 8 の表面に形成された D L C 膜の一例について図 2 4 に基づいて説明する。図 2 4 に示すように、被加工材料 8 の表面には、複数回、例えば 4 回の負のバイアス電圧パルス 9 6 が印加されて成膜された低硬度 D L C 膜 9 8 と、複数回、例えば 4 回の負のバイアス電圧パルス 9 7 が印加されて成膜された高硬度 D L C 膜 9 9 とがそれぞれ所定膜厚で交互に積層されている。

[0151] これにより、第 6 実施形態に係る成膜装置 9 5 では、被加工材料 8 の表面に低硬度 D L C 膜 9 8 と高硬度 D L C 膜 9 9 とを交互に積層することによっても各 D L C 膜 9 8、9 9 の被加工材料 8 への密着性を高めることができる。

[0152] 尚、本発明は前記第 1 実施形態乃至第 6 実施形態に限定されることはなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲内で種々の改良、変形が可能であることは勿論である。例えば、以下のようにしてもよい。

[0153] (A) 例えば、第 4 実施形態に係る成膜装置 8 1 において、マイクロ波パルス 5 1 を 1 パルス供給する「順番」に対応づけて、シース層 4 2 のシース厚さを所定の範囲で徐々に小さくするように、負のバイアス電圧パルス 8 2 A、8 2 B、8 2 C、・・・の負の印加電圧の絶対値を徐々に小さくなるように設定するようにしてもよい。これにより、被加工材料 8 の表面に形成された D L C 膜 7 3 内の膜硬度が、膜厚方向外側へ離れるに従って徐々に低く

なるようにすることができ、被加工材料 8 の表面に形成された DLC 膜 7 3 の摺動する接触部材へのなじみの向上を図ることができる。

[0154] (B) 例えば、第 4 実施形態に係る成膜装置 8 1 において、図 2 1 に示すマイクロ波パルス 5 1 を 1 パルス供給する「順番」に対応づけて、シース層 4 2 のシース厚さを所定の範囲で徐々に小さくするように、2 パルス毎に設定された負のバイアス電圧パルス 8 2 A、8 2 A、8 2 B、8 2 B、8 2 C、8 2 C、・・・の負の印加電圧の絶対値を 2 パルス毎に徐々に小さくなるように設定するようにしてもよい。これにより、被加工材料 8 の表面に形成された DLC 膜 7 3 内の膜硬度が、膜厚方向外側へ離れるに従って徐々に低くなるようにすることができ、被加工材料 8 の表面に形成された DLC 膜 7 3 の摺動する接触部材へのなじみの向上を図ることができる。

[0155] (C) 例えば、第 5 実施形態に係る成膜装置 9 1 において、マイクロ波パルス 5 1 を 1 パルス供給する「順番」に対応づけて、シース層 4 2 のシース厚さを所定の範囲で徐々に小さくするように、負のバイアス電圧パルス 7 2 A、7 2 B、7 2 C、・・・の負の印加電圧の絶対値を徐々に小さくなるように設定するようにしてもよい。これにより、被加工材料 8 の表面に形成された DLC 膜 7 3 内の膜硬度が、膜厚方向外側へ離れるに従って徐々に低くなるようにすることができ、被加工材料 8 の表面に形成された DLC 膜 7 3 の摺動する接触部材へのなじみの向上を図ることができる。

[0156] (D) 例えば、第 1 実施形態乃至第 6 実施形態では、被加工材料 8 は保持具 9 によって保持されているが、マイクロ波供給口 2 2 に直接支持されるように構成してもよい。

請求の範囲

- [請求項1] 導電性を有する被加工材料の処理表面に沿ってプラズマを生成させるためのマイクロ波を供給するマイクロ波供給部と、
前記被加工材料の処理表面に沿うシース層を拡大させる負のバイアス電圧を前記被加工材料に印加する負電圧印加部と、
前記マイクロ波供給部と前記負電圧印加部とを制御する制御部と、
を備え、
前記マイクロ波供給部は、供給するマイクロ波を拡大された前記シース層へ伝搬させるマイクロ波供給口を有し、
前記制御部は、前記マイクロ波の供給中に、前記シース層のシース厚さを変化させるように前記マイクロ波供給部と前記負電圧印加部とを制御することを特徴とする成膜装置。
- [請求項2] 前記制御部は、前記マイクロ波供給部によるマイクロ波の供給中に、前記被加工材料に印加される前記負のバイアス電圧の電圧値を変化させて前記シース厚さを変化させるように前記負電圧印加部を駆動制御することを特徴とする請求項1に記載の成膜装置。
- [請求項3] 前記制御部は、前記マイクロ波供給部によるマイクロ波の供給中に、前記被加工材料に電圧値の異なる複数種類のパルス状の負のバイアス電圧を順次印加して、前記シース厚さの拡大と減縮を繰り返すように前記負電圧印加部を駆動制御することを特徴とする請求項2に記載の成膜装置。
- [請求項4] 前記制御部は、前記マイクロ波供給部によるマイクロ波の供給中に、前記被加工材料に印加される前記負のバイアス電圧の電圧値を1パルス毎又は複数パルス毎に徐々に変化させるように前記負電圧印加部を駆動制御することを特徴とする請求項2又は請求項3に記載の成膜装置。
- [請求項5] 前記制御部は、前記被加工材料に前記負のバイアス電圧を印加する負電圧電極の形状が、前記シース層内を前記マイクロ波が表面波とし

て伝搬する伝搬方向において、不連続部を形成する場合には、前記シース層内を伝搬する前記表面波の波長に基づいて前記負のバイアス電圧の電圧値を変化させることを特徴とする請求項2乃至請求項4のいずれかに記載の成膜装置。

[請求項6] 前記マイクロ波供給部は、前記被加工材料にパルス状のマイクロ波を供給し、

前記制御部は、前記マイクロ波の1パルス内において、前記負のバイアス電圧の電圧値を変化させて前記シース厚さを変化させるように前記負電圧印加部を駆動制御することを特徴とする請求項2乃至請求項5のいずれかに記載の成膜装置。

[請求項7] 導電性を有する被加工材料にマイクロ波供給口を介してマイクロ波を供給するマイクロ波供給部と、負のバイアス電圧を前記被加工材料に印加する負電圧印加部と、制御部と、を備えた成膜装置で実行される成膜方法であって、

前記制御部が実行する、

前記マイクロ波供給部を介して前記被加工材料の処理表面に沿ってプラズマを生成させるためのマイクロ波を供給するマイクロ波供給工程と、

前記負電圧印加部を介して前記被加工材料の処理表面に沿うシース層を拡大させる負のバイアス電圧を前記被加工材料に印加する負電圧印加工程と、

前記マイクロ波供給口を介して供給されるマイクロ波を拡大された前記シース層へ伝搬させるマイクロ波伝搬工程と、

前記マイクロ波供給部と前記負電圧印加部とを制御する制御工程と、

を備え、

前記制御部は、前記制御工程において、前記マイクロ波の供給中に、前記シース層のシース厚さを変化させるように前記マイクロ波供給

部と前記負電圧印加部とを制御することを特徴とする成膜方法。

[請求項8]

導電性を有する被加工材料にマイクロ波供給口を介してマイクロ波を供給するマイクロ波供給部と、負のバイアス電圧を前記被加工材料に印加する負電圧印加部と、を備えた成膜装置を制御するコンピュータに、

前記マイクロ波供給部を介して前記被加工材料の処理表面に沿ってプラズマを生成させるためのマイクロ波を供給するマイクロ波供給工程と、

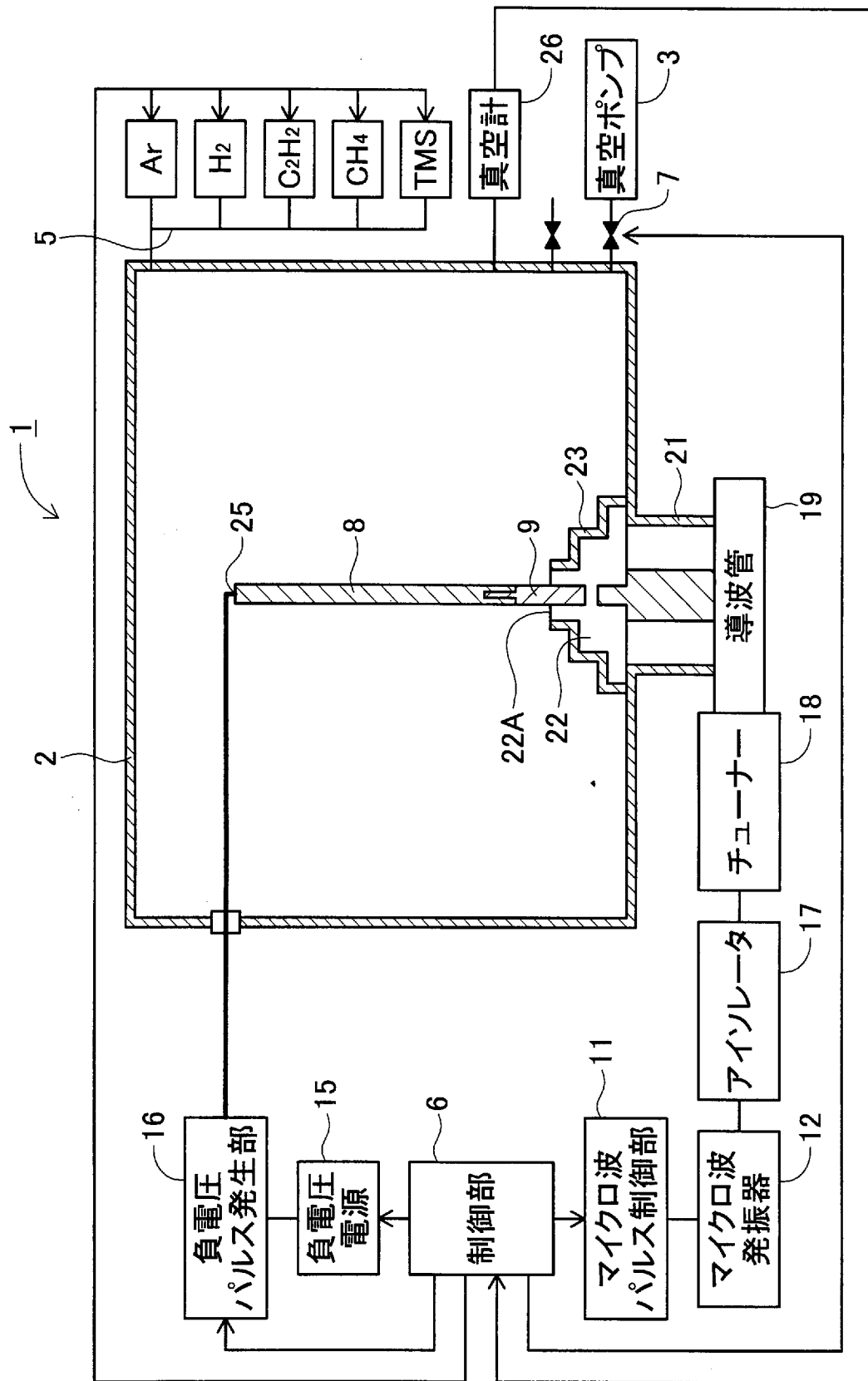
前記負電圧印加部を介して前記被加工材料の処理表面に沿うシース層を拡大させる負のバイアス電圧を前記被加工材料に印加する負電圧印加工程と、

前記マイクロ波供給口を介して供給されるマイクロ波を拡大された前記シース層へ伝搬させるマイクロ波伝搬工程と、

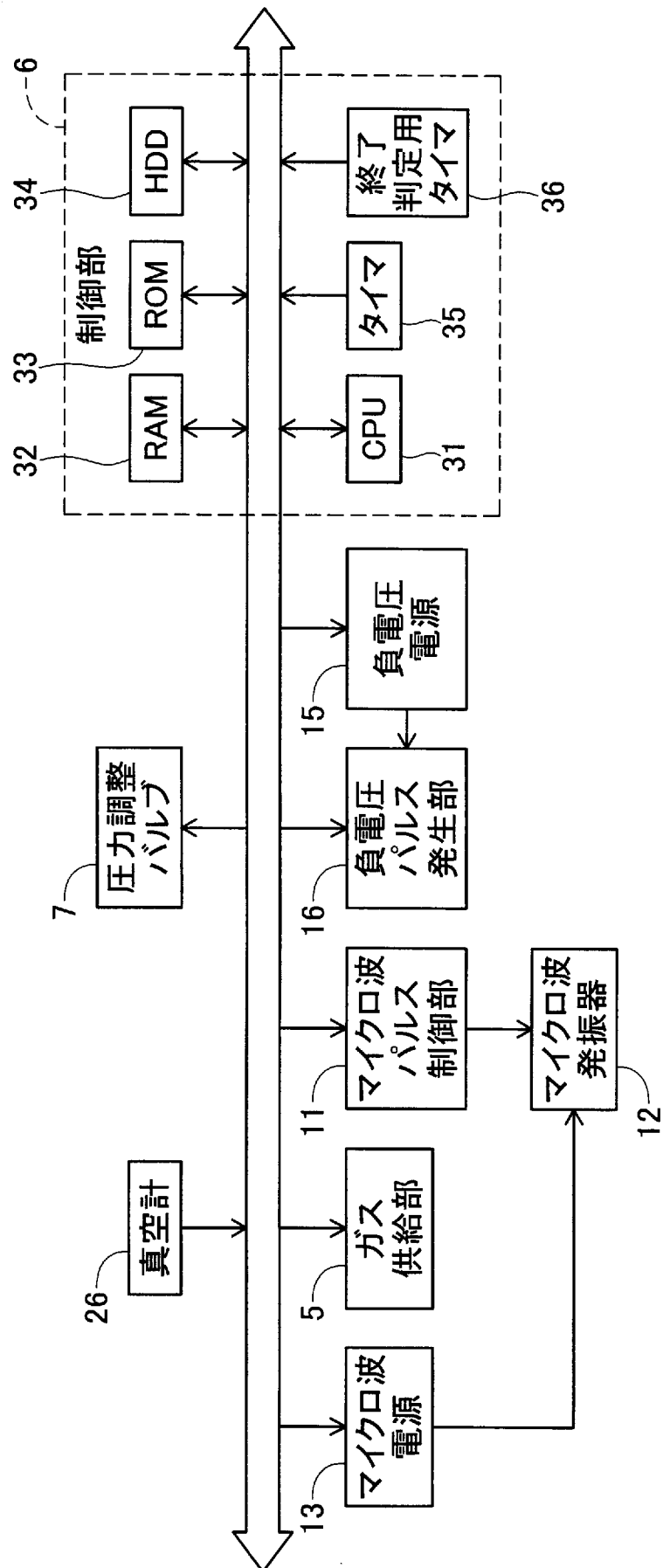
前記マイクロ波供給部と前記負電圧印加部とを制御する制御工程と、を実行させ、

前記制御工程において、前記マイクロ波の供給中に、前記シース層のシース厚さを変化させるように前記マイクロ波供給部と前記負電圧印加部とを制御するように実行させることを特徴とする成膜プログラム。

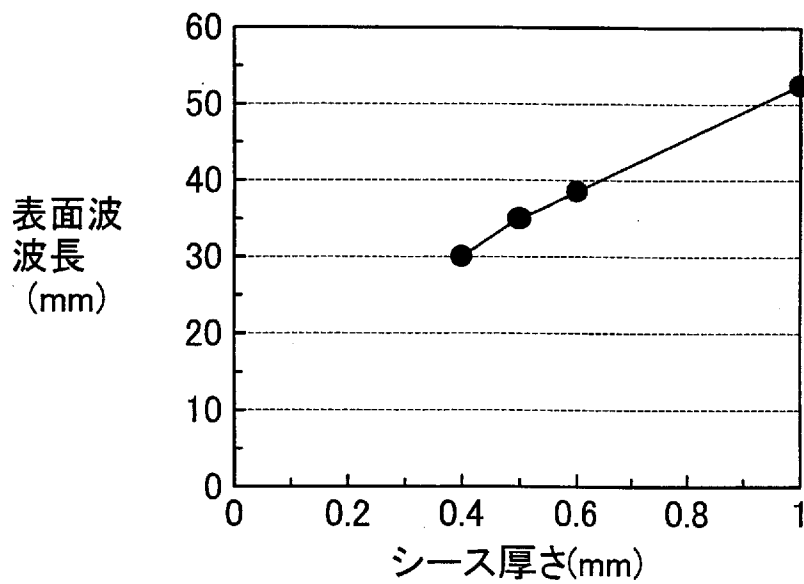
[図1]



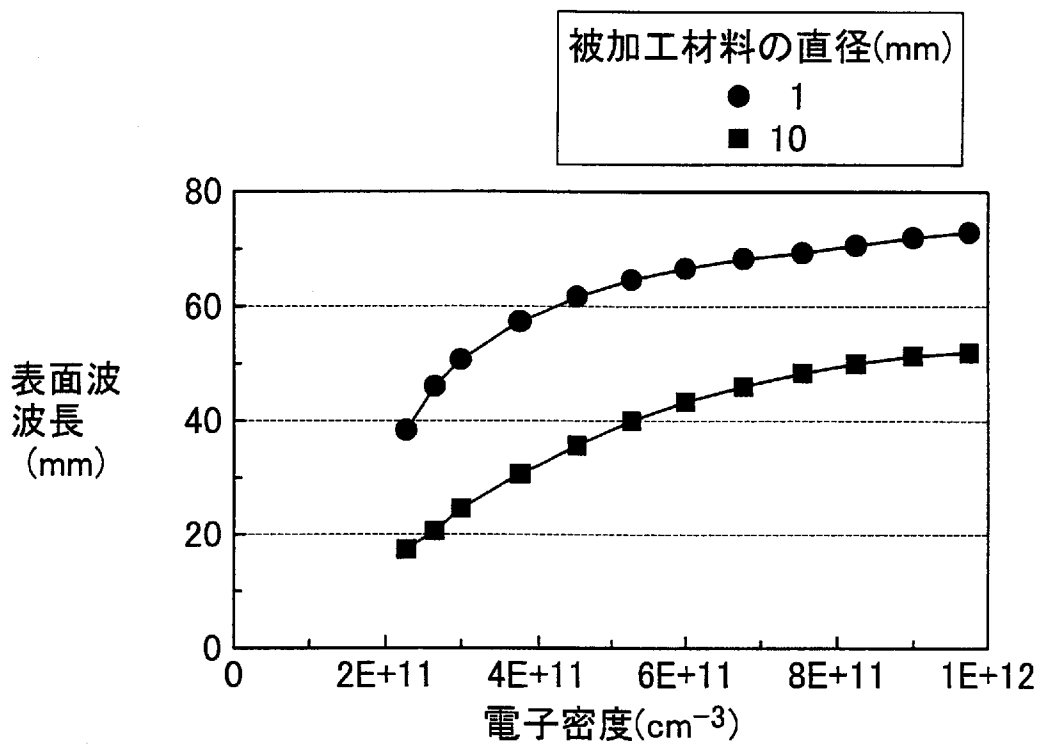
[図2]



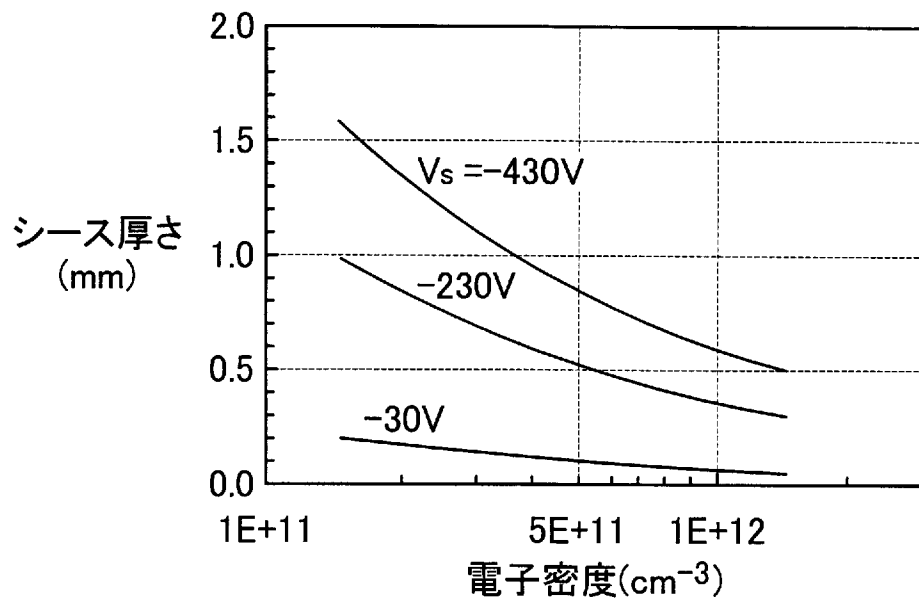
[図3]



[図4]

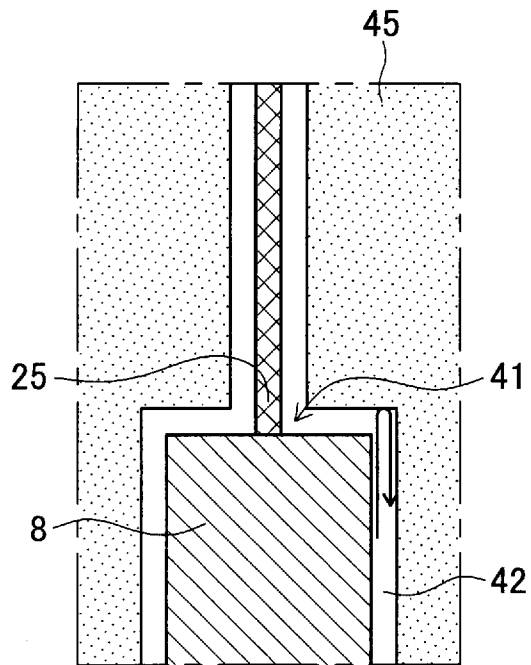


[図5]

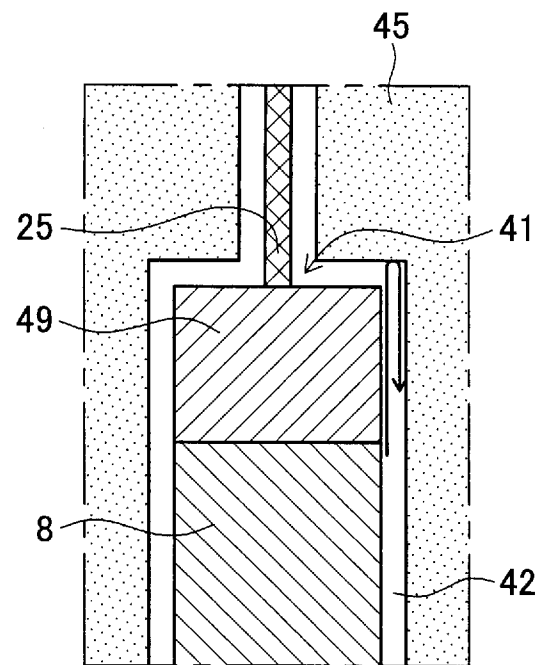


[図6]

(A)

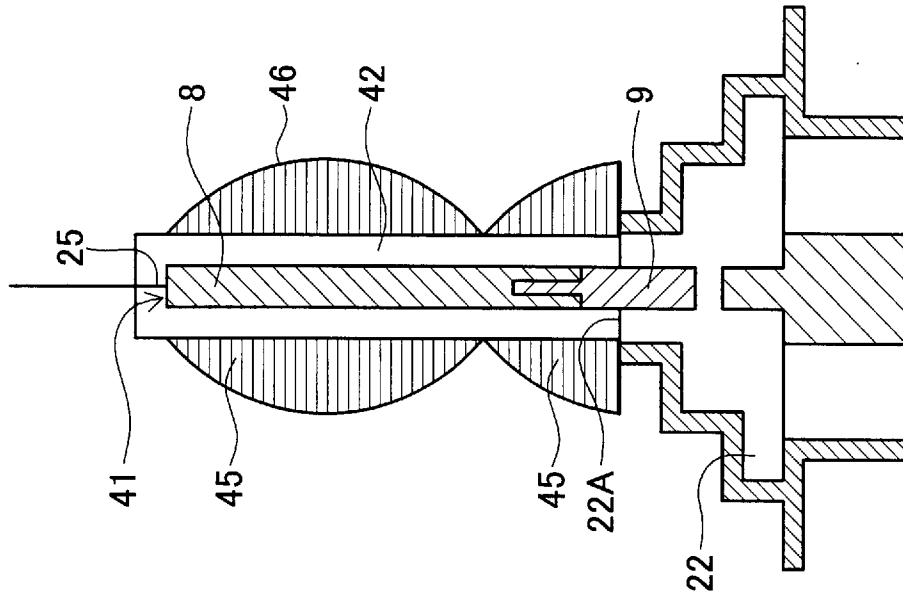


(B)



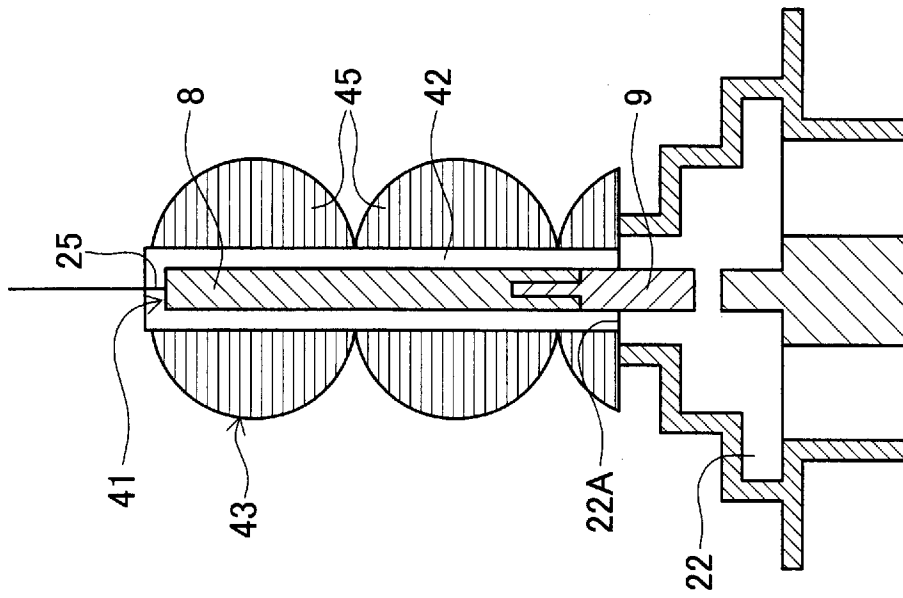
[図7]

(B)



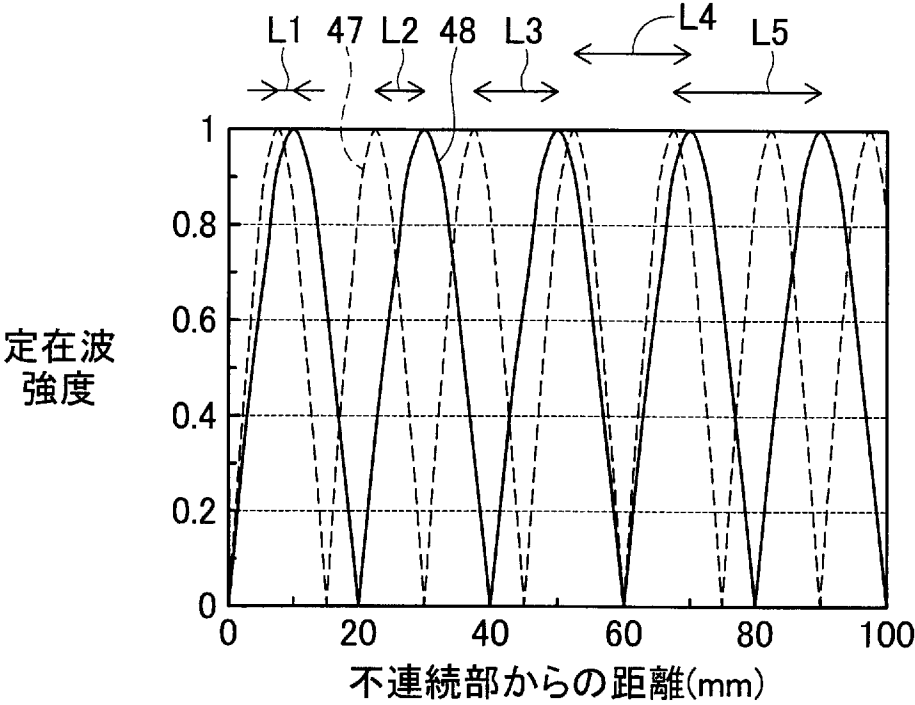
シース厚さ大→表面波の波長大

(A)

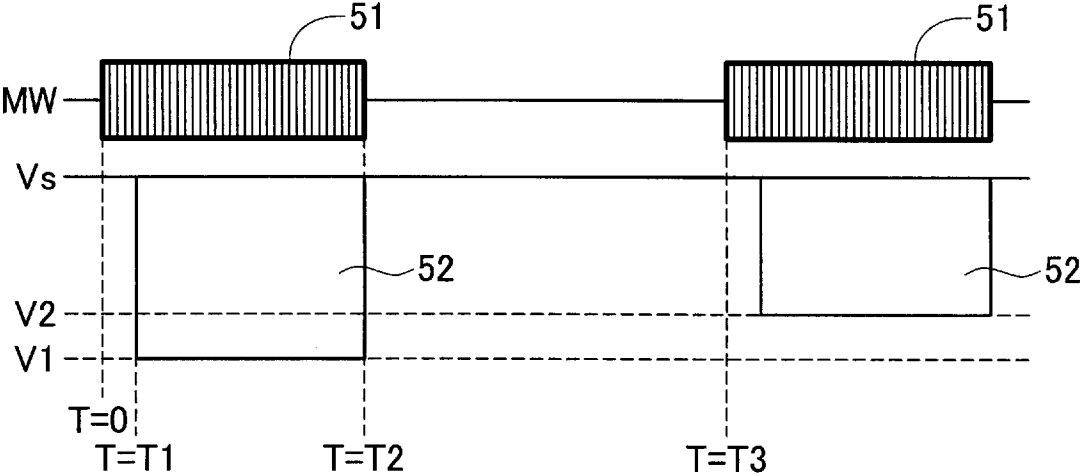


シース厚さ小→表面波の波長小

[図8]



[図9]

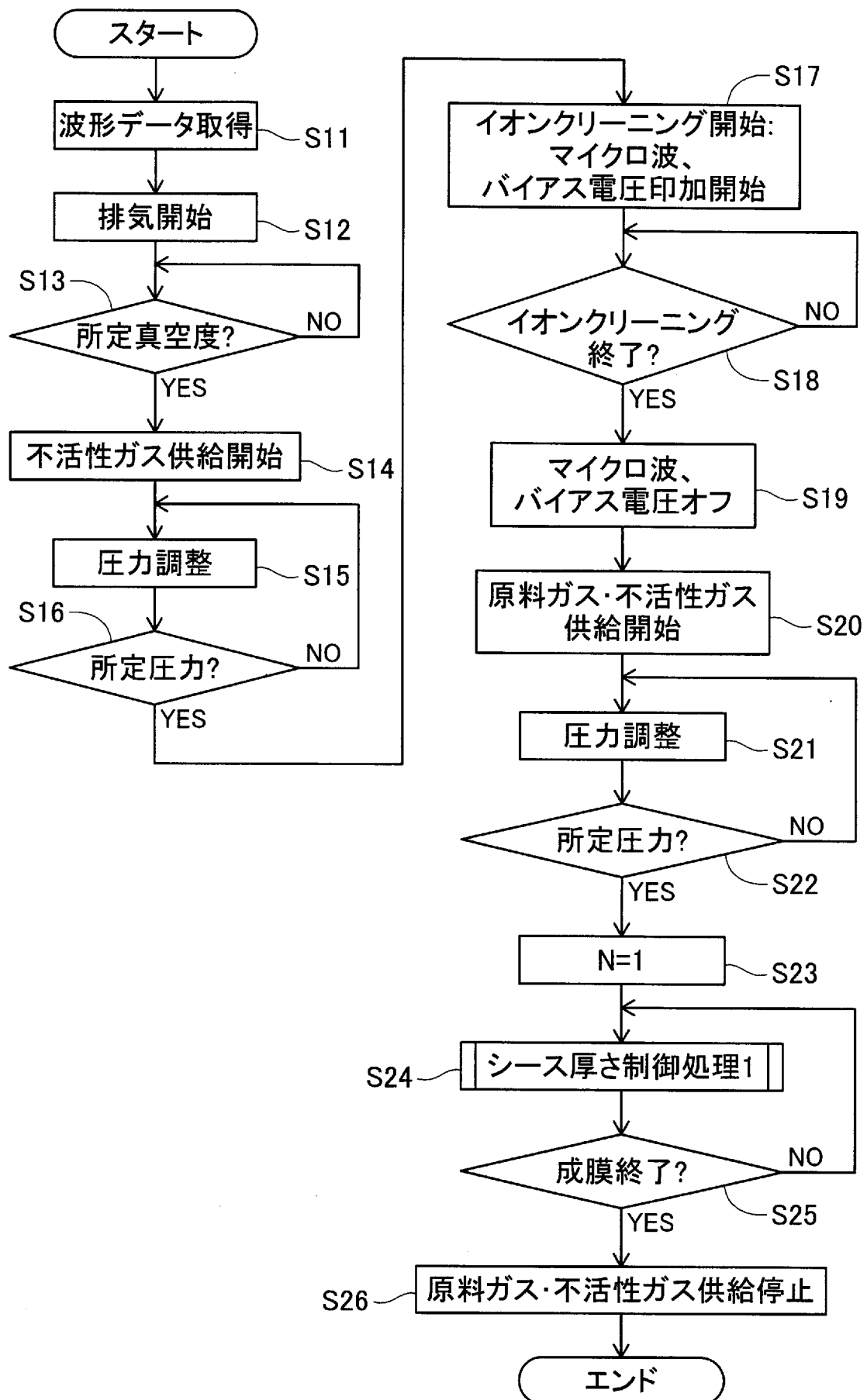


[図10]

順番	マイクロ波出力(kW)	負のバイアス電圧(V)
1	P1	V1
2	P2	V2
3	P3	V3
⋮	⋮	⋮
M-1	PM-1	VM-1
M	PM	VM

55

[図11]



[図12]

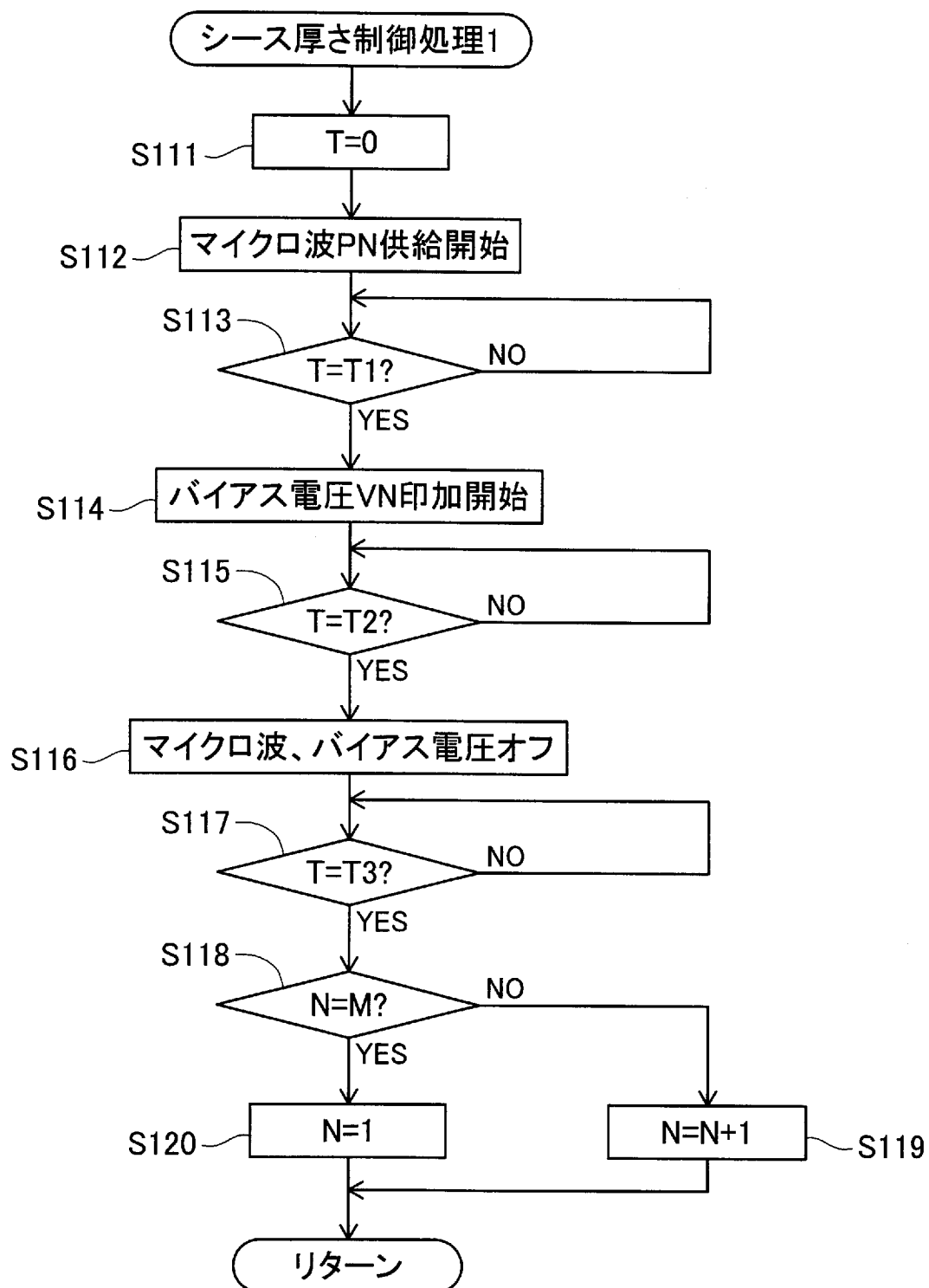
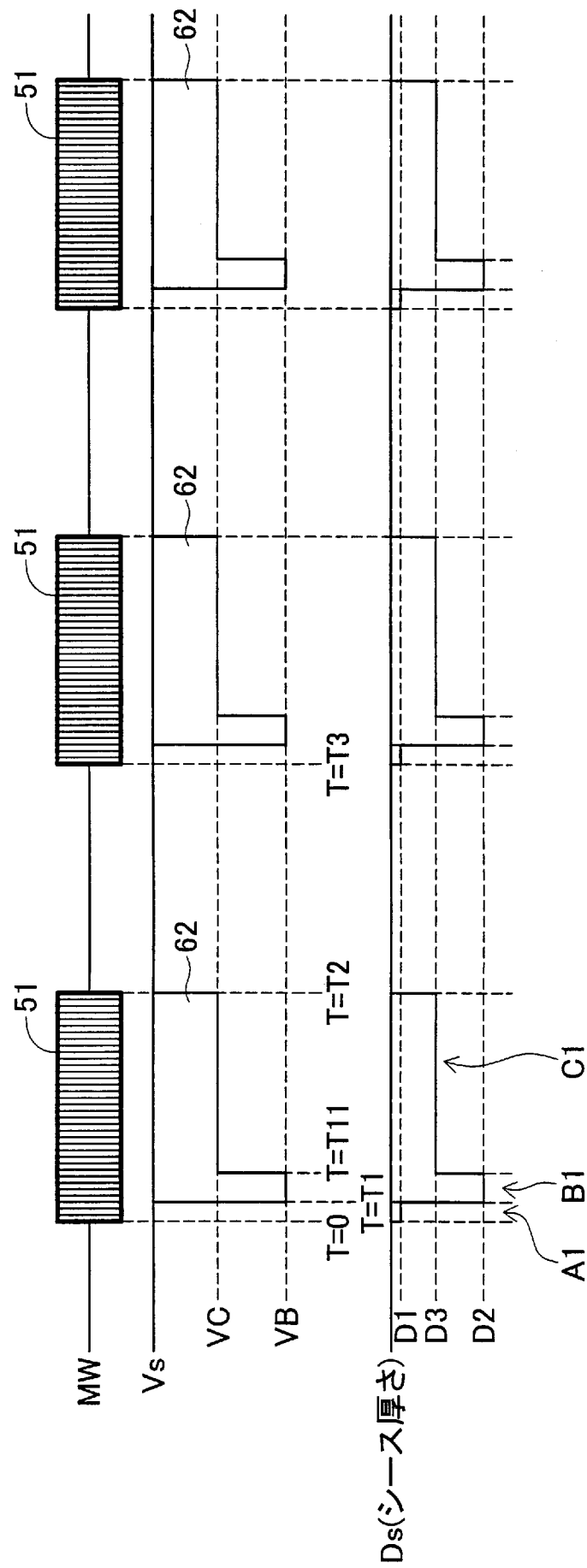
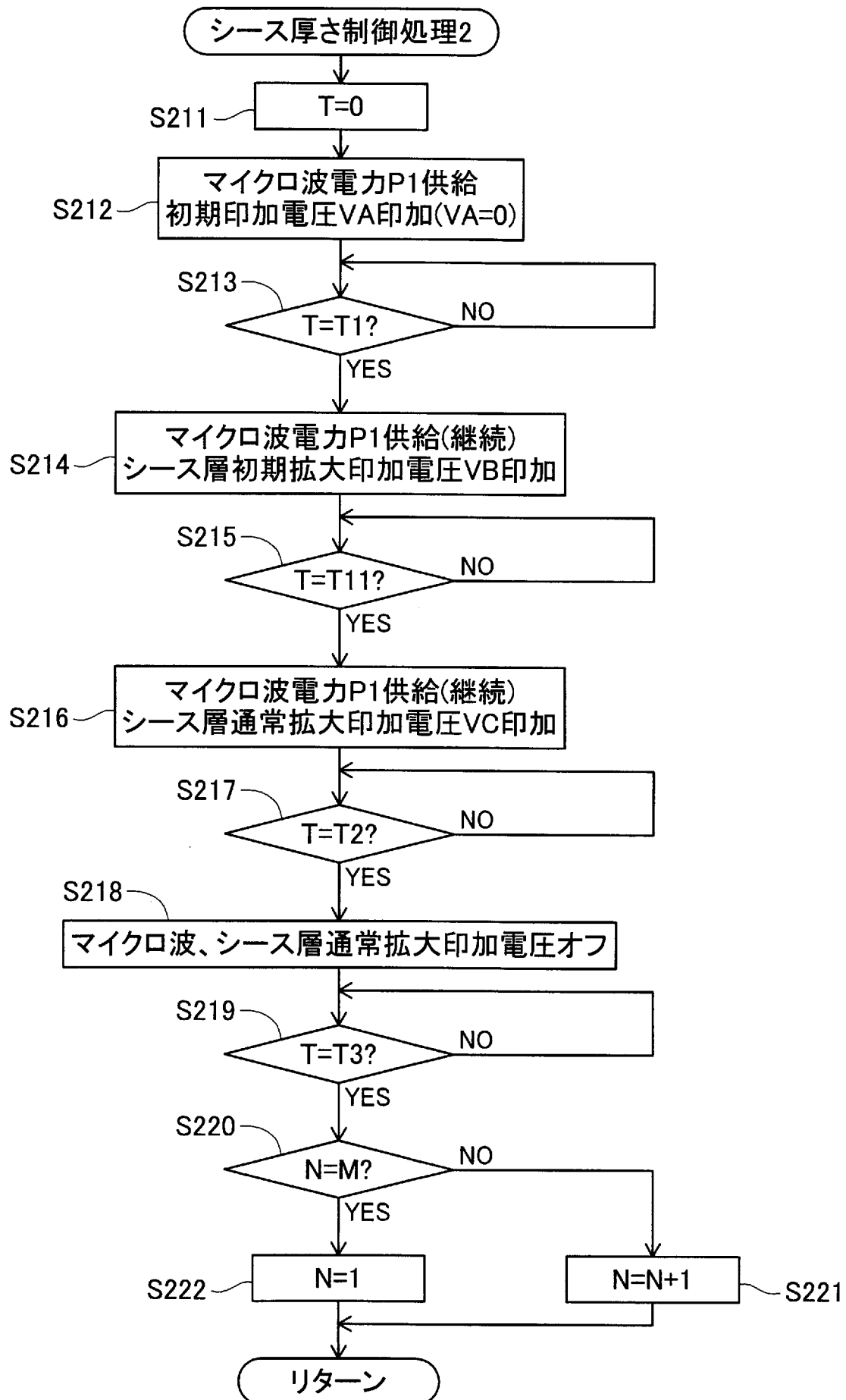


Figure 1 is a schematic diagram of a superconducting quantum circuit. The top part shows a chain of Josephson junctions (51) connected to a microwave (MW) line. The bottom part shows a series of gates (52A, 52B, 52C, 52D) with different thicknesses (0.57mm, 0.49mm, 0.4mm) and voltages (-200V, -279V, -358V) applied to them. The gates are labeled 52A, 52B, 52C, 52D, and 52E. The diagram is divided into sections labeled 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, and N.

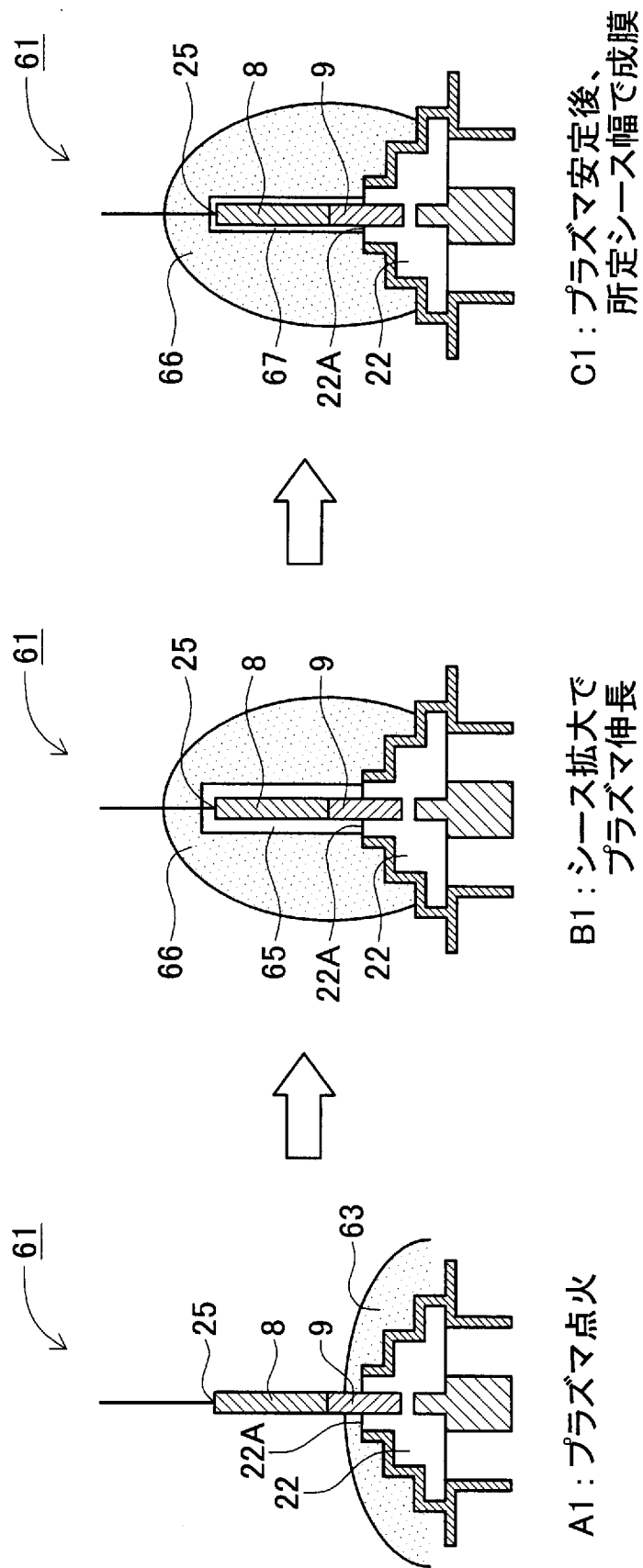
[図14]



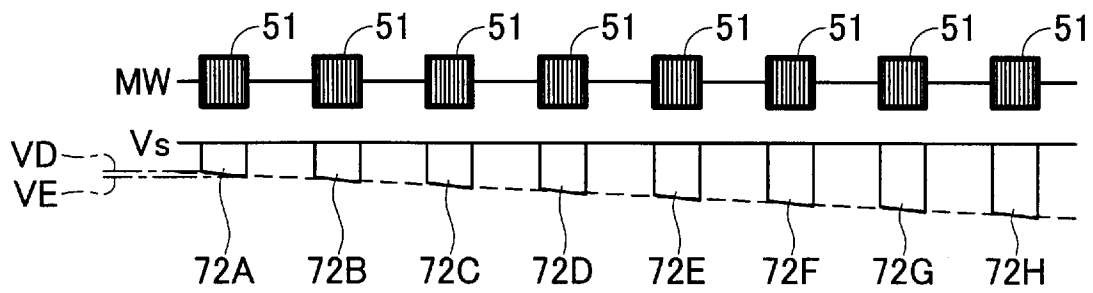
[図15]



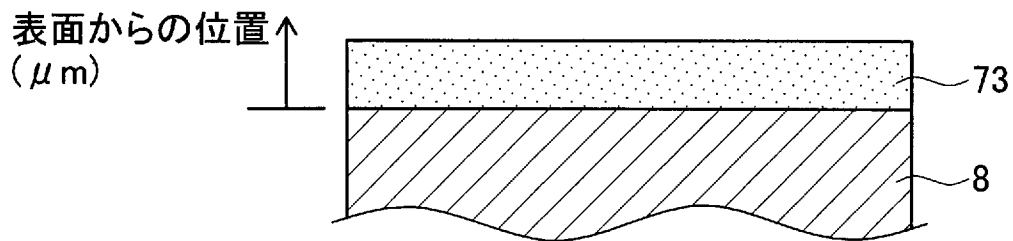
[図16]



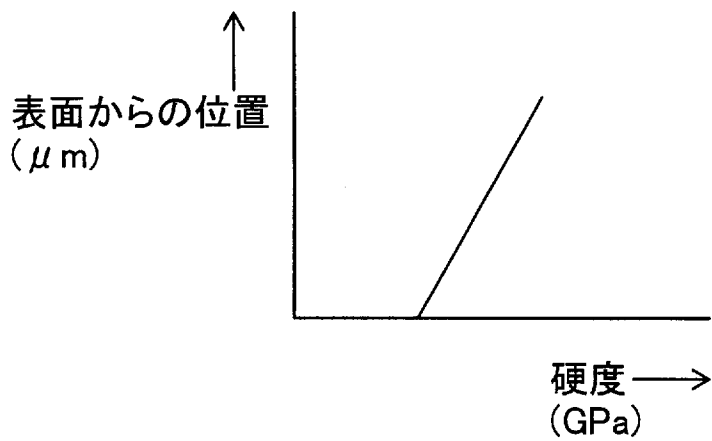
[図17]



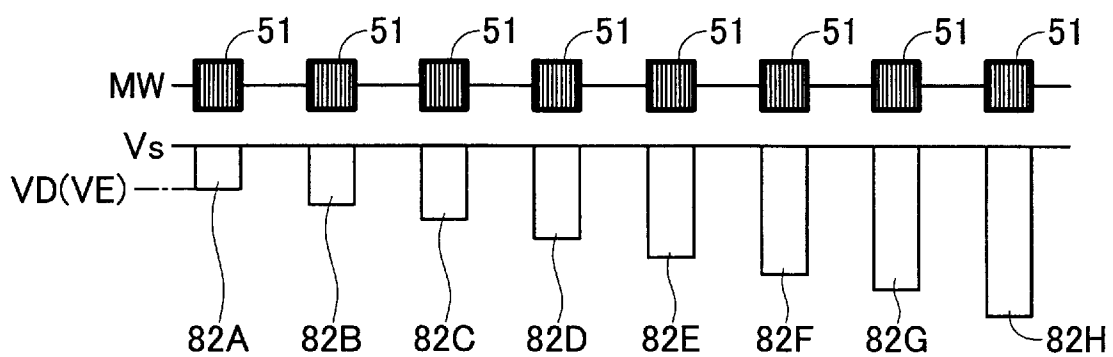
[図18]



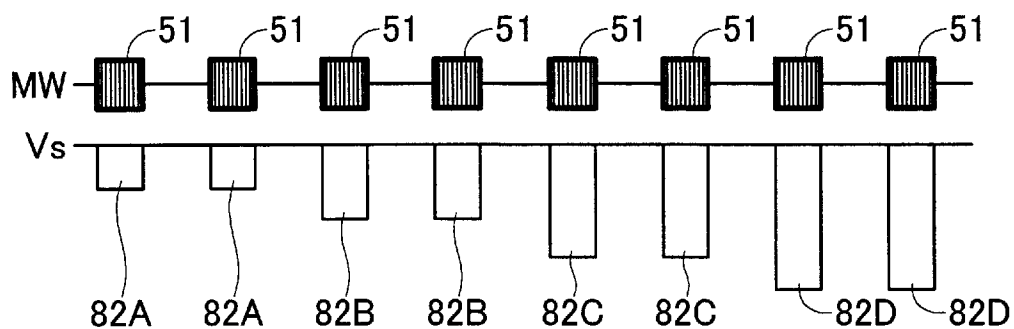
[図19]



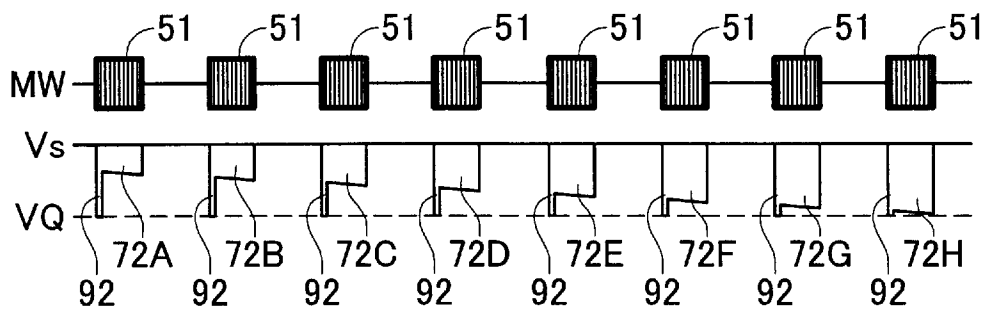
[図20]



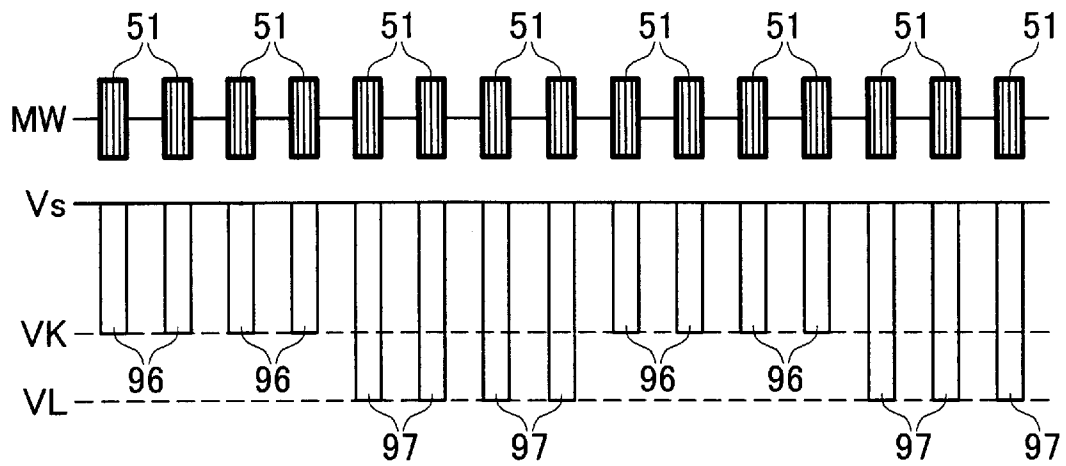
[図21]



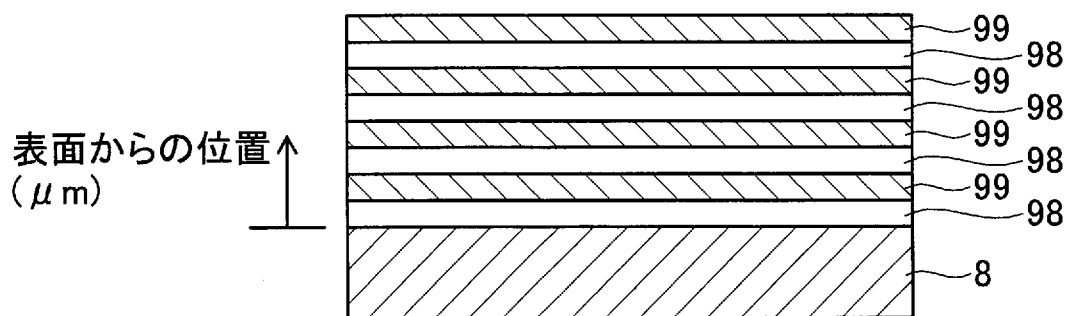
[図22]



[図23]



[図24]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/057090

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C23C16/511(2006.01)i, C23C16/52(2006.01)i, H05H1/46(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

C23C16/50-16/56, H05H1/46

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2014
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2014	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2014

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JSTPlus (JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2009-70735 A (Nagoya University), 02 April 2009 (02.04.2009), claim 1; paragraphs [0023] to [0033], [0049] to [0051]; fig. 1 (Family: none)	1, 2, 7, 8 3-6
Y A	WO 2008/010537 A1 (Nagoya University), 24 January 2008 (24.01.2008), claim 14; paragraphs [0001], [0025] to [0047]; fig. 1 & JP 4973887 B & US 2009/0286011 A1	1, 2, 7, 8 3-6
Y	Sho KISHINE et al., "High-speed deposition of diamond-like carbon on the inner wall of metal pipe by using surface wave-excited plasma", Journal of IAPS, 2006, vol.14, pages 73 to 80	1, 2, 7, 8

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
10 June, 2014 (10.06.14)

Date of mailing of the international search report
17 June, 2014 (17.06.14)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/057090

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 1-294867 A (Semiconductor Energy Laboratory Co., Ltd.), 28 November 1989 (28.11.1989), claims; page 5, lower right column, lines 2 to 20 & US 4996079 A & EP 330524 A1 & KR 10-1991-0005836 B & CN 1035855 A	1, 2, 7, 8
A	Hiroyuki KOUSAKA, et al., Internal DLC coating of narrow metal tubes using high-density near plasma sustained by microwaves propagating along plasma-sheath interfaces, Surface & Coatings Technology, 2012.05.17 (Available online), Vol.229, Page.65-70	1-8
A	Hiroyuki KOSAKA et al., "Study on speed-up of diamond-like carbon deposition to the inner wall of tube by using surface wave-excited plasma source", The Institute of Electrical Engineers of Japan Plasma Kenkyukai Shiryo, 2008, vol.PST-08, no.26 to 36, pages 25 to 28	1-8
P,X	JP 2013-155409 A (Brother Industries, Ltd.), 15 August 2013 (15.08.2013), claims 1, 9; paragraphs [0039] to [0054], [0066], [0074] to [0075], [0096]; fig. 1, 6 (Family: none)	1, 2, 7, 8

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. C23C16/511(2006.01)i, C23C16/52(2006.01)i, H05H1/46(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. C23C16/50-16/56, H05H1/46

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 4 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 4 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 4 年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

J S T P l u s (J D r e a m I I I)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	JP 2009-70735 A（国立大学法人名古屋大学）2009.04.02, 請求項1, 【0023】－【0033】, 【0049】－【0051】, 図1（ファミリーなし）	1, 2, 7, 8 3-6
Y A	WO 2008/010537 A1（国立大学法人名古屋大学）2008.01.24, 請求項14, [0001], [0025]－[0047], 図1 & JP 4973887 B & US 2009/0286011 A1	1, 2, 7, 8 3-6

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

1 0 . 0 6 . 2 0 1 4

国際調査報告の発送日

1 7 . 0 6 . 2 0 1 4

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

安齋 美佐子

4 G

9 4 3 9

電話番号 03-3581-1101 内線 3416

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	岸根 翔, 他, 表面波励起プラズマによる金属円筒内面への高速ダイヤモンドドライカーボン成膜, プラズマ応用科学, 2006, Vol. 14, Page. 73-80	1, 2, 7, 8
Y	JP 1-294867 A (株式会社半導体エネルギー研究所) 1989. 11. 28, 特許請求の範囲, 5 頁右下欄 2 - 20 行 & US 4996079 A & EP 330524 A1 & KR 10-1991-0005836 B & CN 1035855 A	1, 2, 7, 8
A	Hiroyuki KOUSAKA, et al., Internal DLC coating of narrow metal tubes using high-density near plasma sustained by microwaves propagating along plasma-sheath interfaces, Surface & Coatings Technology, 2012. 05. 17 (Available online), Vol. 229, Page. 65-70,	1-8
A	上坂裕之, 他, 表面波励起プラズマを用いた円筒内面DLC成膜の高速化に関する研究, 電気学会プラズマ研究会資料, 2008, Vol. PST-08 No. 26-36, Page. 25-28	1-8
P, X	JP 2013-155409 A (ブラザー工業株式会社) 2013. 08. 15, 請求項 1, 9, 【0039】 - 【0054】, 【0066】, 【0074】 - 【0075】, 【0096】, 図 1, 6 (ファミリーなし)	1, 2, 7, 8