

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4547711号
(P4547711)

(45) 発行日 平成22年9月22日 (2010.9.22)

(24) 登録日 平成22年7月16日 (2010.7.16)

(51) Int. Cl.	F I
HO 1 L 21/205 (2006.01)	HO 1 L 21/205
C 2 3 C 16/52 (2006.01)	C 2 3 C 16/52
C 2 3 C 16/505 (2006.01)	C 2 3 C 16/505
C 2 3 C 16/24 (2006.01)	C 2 3 C 16/24
HO 1 L 31/04 (2006.01)	HO 1 L 31/04 T

請求項の数 3 (全 50 頁)

(21) 出願番号 特願2008-263567 (P2008-263567)
 (22) 出願日 平成20年10月10日 (2008.10.10)
 (65) 公開番号 特開2009-21634 (P2009-21634A)
 (43) 公開日 平成21年1月29日 (2009.1.29)
 審査請求日 平成21年10月15日 (2009.10.15)

(73) 特許権者 303034908
 村田 正義
 長崎県長崎市城山台2丁目10の5
 (72) 発明者 村田正義
 長崎県長崎市城山台2丁目10の5

審査官 山本 雄一

(56) 参考文献 特開2006-332704 (JP, A)
)
 特開2005-123203 (JP, A)
)

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 高周波プラズマCVD装置及び高周波プラズマCVD法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

プラズマを利用して真空容器に配置される基板の表面に薄膜を形成する高周波プラズマCVD装置において、原料ガスが噴出するガスシャワー孔を有する原料ガス供給系を内蔵した電氣的に非接地の平行平板型の第1の電極及び基板を載置する平行平板型の第2の電極とから成る一対の電極と、前記真空容器内のガスを排気する排気系と、前記一対の電極に第1及び第2の整合器を介して高周波電力を供給する高周波電力供給系とを有し、前記一対の電極間に供給される原料ガスをプラズマ化するに際し、

前記高周波電力供給系を、第1のパルス変調方式位相可変2出力発信器と、前記第1のパルス変調方式位相可変2出力発信器から発信されるパルス変調の同期信号に同期して信号を発生する第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器と、前記第1及び第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器の出力信号の電力を増幅する第1及び第2の電力増幅器とより構成し、

前記第1の電極の一方の端部に第1の給電点を、その他方の端部に第2の給電点を配置し、前記第2の電極の一方の端部に第3の給電点を、その他方の端部に第4の給電点を配置するとともに、前記第1の給電点と第2の給電点との間隔を前記高周波電力供給系の出力電力の波長短縮率を考慮した波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定し、前記第1及び第3の給電点に、前記第1の整合器を介して前記第1のパルス変調方式位相可変2出力発信器の一方の出力であるパルス変調された第1の出力電力を供給し、前記第2及び第4の給電点に前記第2の整合器を介して前記第1のパルス変調方式位相可変2出

力発信器の他方の出力である第2の出力電力を供給し、かつ、前記第1及び第2の出力電力の位相差を調整することにより前記第1及び第2の給電点を結ぶ線分の中間地点に腹がある第1の定在波を発生させ、前記第1の定在波の発生時間帯と異なる時間帯に、前記第1及び第3の給電点に前記第1の整合器を介して前記第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器の一方の出力であるパルス変調された第3の出力電力を供給し、前記第2及び第4の給電点に前記第2の整合器を介して前記第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器の他方の出力である第4の出力電力を供給し、かつ、前記第3及び第4の出力電力の位相差を調整することにより前記第1及び第2の給電点を結ぶ線分の中間地点に節がある第2の定在波を発生させるということの特徴とする高周波プラズマCVD装置。

【請求項2】

プラズマを利用して真空容器に配置される基板の表面に薄膜を形成する高周波プラズマCVD装置において、原料ガスが噴出するガスシャワー孔を有する原料ガス供給系を内蔵した電氣的に非接地の平行平板型の第1の電極及び基板を載置する平行平板型の第2の電極とから成る一対の電極と、前記真空容器内のガスを排気する排気系と、第1の整合器の出力端子に接続された第1の平衡不平衡変換装置及び第2の整合器の出力端子に接続された第2の平衡不平衡変換装置を介して前記一対の電極に高周波電力を供給する高周波電力供給系とを有し、前記一対の電極間に供給される原料ガスをプラズマ化するに際し、前記高周波電力供給系を、第1のパルス変調方式位相可変2出力発信器と、前記第1のパルス変調方式位相可変2出力発信器から発信されるパルス変調の同期信号に同期して信号を発生する第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器と、前記第1及び第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器の出力信号の電力を増幅する第1及び第2の電力増幅器とより構成し、

前記第1の電極の一方の端部に第1の給電点を、その他方の端部に第2の給電点を配置し、前記第2の電極の一方の端部に第3の給電点を、その他方の端部に第4の給電点を配置するとともに、前記第1の給電点と第2の給電点との間隔を前記高周波電力供給系の出力電力の波長短縮率を考慮した波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定し、前記第1の平衡不平衡変換装置と前記第1及び第3の給電点との接続を、第1の管状導体と、第1の管状導体内に設けた第1の長方形板状導体及び第2の長方形板状導体の間に介在する第1の誘電体から成る第1の平衡伝送線路を用い、第1の長方形板状導体を第1の給電点に接続し、第2の長方形板状導体を第3の給電点に接続し、前記第2の平衡不平衡変換装置と前記第2及び第4の給電点との接続を、第2の管状導体と、第2の管状導体内に設けた第3の長方形板状導体及び第4の長方形板状導体の間に介在する第2の誘電体から成る第2の平衡伝送線路を用い、第3の長方形板状導体を第2の給電点に接続し、第4の長方形板状導体を第4の給電点に接続するとともに、

前記第1及び第3の給電点に第1の平衡伝送線路を介して前記第1のパルス変調方式位相可変2出力発信器の一方の出力であるパルス変調された第1の出力電力を供給し、前記第2及び第4の給電点に第2の平衡伝送線路を介して前記第1のパルス変調方式位相可変2出力発信器の他方の出力であるパルス変調された第2の出力電力を供給し、かつ、前記第1及び第2の出力電力の位相差を調整することにより前記第1及び第2の給電点を結ぶ線分の中間地点に腹がある第1の定在波を発生させ、前記第1の定在波の発生時間帯と異なる時間帯に、前記第1及び第3の給電点に第1の平衡伝送線路を介して前記第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器の一方の出力であるパルス変調された第3の出力電力を供給し、前記第2及び第4の給電点に第2の平衡伝送線路を介して前記第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器の他方の出力であるパルス変調された第4の出力電力を供給し、かつ、前記第3及び第4の出力電力の位相差を調整することにより前記第1及び第2の給電点を結ぶ線分の中間地点に節がある第2の定在波を発生させるということの特徴とする高周波プラズマCVD装置。

【請求項3】

電源の周波数がVHF領域(30MHz~300MHz)であるプラズマを利用して真空容器に配置される基板の表面に薄膜を形成する高周波プラズマCVD法において、原料

10

20

30

40

50

ガスが噴出するガスシャワー孔を有する原料ガス供給系を内蔵した電氣的に非接地の平行平板型の第1の電極及び基板を載置する平行平板型の第2の電極とから成る一対の電極と、前記真空容器内のガスを排気する排気系と、前記一対の電極に第1及び第2の整合器を介して高周波電力を供給する高周波電力供給系とを有し、かつ、前記高周波電力供給系はVHF帯域(30MHz~300MHz)の周波数の正弦波信号を発生する第1のパルス変調方式位相可変2出力発信器と、前記第1のパルス変調方式位相可変2出力発信器から発信されるパルス変調の同期信号に同期して信号を発生する第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器と、前記第1及び第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器の出力信号の電力を増幅する第1及び第2の電力増幅器とにより構成された高周波プラズマCVD装置を用いた高周波プラズマCVD法であって、

10

前記第1の電極の一方の端部に第1の給電点を、その他方の端部に第2の給電点を配置し、前記第2の電極の一方の端部に第3の給電点を、その他方の端部に第4の給電点を配置するとともに、前記第1の給電点と第2の給電点との間隔を前記高周波電力供給系の出力電力の波長短縮率を考慮した波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定する第1のステップと、

前記原料ガス供給系と前記排気系を用いて前記一対の電極間に所定の条件のガスを供給し、前記第1及び第3の給電点に前記第1の整合器を介して前記高周波電力供給系の前記第1のパルス変調方式位相可変2出力発信器の一方の出力であるパルス変調された第1の出力電力を供給し、前記第2及び第4の給電点に前記第2の整合器を介して前記高周波電力供給系の前記第1のパルス変調方式位相可変2出力発信器の他方の出力であるパルス変調された第2の出力電力を供給し、前記第1及び第2の出力電力の位相差を調整することにより前記第1及び第2の給電点を結ぶ線分の中間地点に腹がある第1の定在波を発生させる第2のステップと、

20

前記原料ガス供給系と前記排気系を用いて前記一対の電極間に所定の条件のガスを供給し、前記第1及び第3の給電点に前記第1の整合器を介して前記高周波電力供給系の第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器の一方の出力であるパルス変調された第3の出力電力を供給し、かつ、前記第2及び第4の給電点に前記第2の整合器を介して前記高周波電力供給系の第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器の他方の出力であるパルス変調された第4の出力電力を供給し、前記第3及び第4の出力電力の位相差を調整することにより前記第1及び第2の給電点を結ぶ線分の中間地点に節がある第2の定在波を発生させる第3のステップと、

30

前記原料ガス供給系と前記排気系を用いて前記一対の電極間に所定の条件のガスを供給し、前記第2及び第3のステップで発生された前記第1及び第2の定在波を互いに異なる時間帯で交互に発生させることにより、前記原料ガス供給系から前記一対の電極間に供給される原料ガスを均一にプラズマ化させ、前記基板に目的とする薄膜を形成する第4のステップとから成ることを特徴とする高周波プラズマCVD法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、集積化タンデム型薄膜太陽電池モジュールの製造に用いられる高周波プラズマCVD装置、高周波プラズマCVD法及び半導体薄膜製造法に関する。特に、周波数が30MHz~300MHz(VHF帯域)であるVHFプラズマCVD装置及びVHFプラズマCVD法に関する。

40

また、微結晶シリコン膜及び結晶質シリコン膜を応用した各種デバイスの製造に用いられる高周波プラズマCVD装置及び高周波プラズマCVD法に関する。

【背景技術】

【0002】

光電変換機能をもつ半導体光電変換ユニットを複数積層した多接合型光電変換素子は、例えば太陽電池において、波長吸収帯域の異なるトップセルとボトムセルを組み合わせることは発電変換効率を高める上で非常に有効であることが知られている。

50

これは、透明中間層に入射光エネルギーの各接合ユニットへのスペクトル分配の機能、例えば、短波長の光を反射し、長波長の光を透過させる機能を持たせることにより、より一層の発電変換効率の向上を図ろうとするものである。

【 0 0 0 3 】

具体的には、集積化タンデム型薄膜シリコン太陽電池は、光透過性の基板（例えばガラス）に、透明電極層、非晶質シリコン光電変換ユニット層、短波長の光を反射し、長波長の光を透過させる機能を持たせた中間層、結晶質シリコン光電変換ユニット層及び裏面電極層を、順次積層することにより形成される。

上記非晶質シリコン光電変換ユニット層は p 型半導体層、i 型半導体層及び n 型半導体層等で構成され、厚みは p i n 層全体で、約 0.5 μm 以下である。

上記結晶質シリコン光電変換ユニット層は、p 型微結晶半導体層、i 型微結晶半導体層及び n 型微結晶半導体層等で構成され、厚みは p i n 層全体で、約 3 ~ 5 μm である。なお、i 型微結晶半導体層の厚みは、約 2 ~ 4 μm である。

この集積化タンデム型薄膜太陽電池と呼ばれる非晶質シリコンと結晶質シリコンを組み合わせた太陽電池を製造する生産ラインは、光電変換効率 10 ~ 13 % 級の高効率モジュールを製造可能であると期待されている。

【 0 0 0 4 】

しかしながら、上記集積化タンデム型薄膜太陽電池は光電変換効率の向上が容易に可能であるというメリットが有る反面、約 2 ~ 4 μm の厚みが必要な結晶質シリコン光電変換ユニット層の i 型微結晶半導体層の製造に多大の時間が必要とし、あるいは i 型微結晶半導体層の製造装置を複数設置することが必要となり、生産コストが増大するというデメリットがある。

近年、このデメリットの解消のため、i 型微結晶半導体層の製膜速度の向上技術の開発、及び大面積で、高品質で、且つ均一性良く製造可能なプラズマ C V D 装置の開発等が行われている。

最近では、i 型微結晶半導体層の製膜速度の向上に関する技術として、V H F（超高周波数帯域：30 M H z ~ 300 M H z）プラズマ C V D 装置を用いることにより、製膜条件として、大量の水素で希釈されたシランガス（S i H 4）を用い、高い圧力で、大電力を供給することにより、実現できるようになった。

しかしながら、大面積で、均一性良く、且つ、高品質に製造可能なプラズマ C V D 装置の開発は、依然として、問題が多く、齟齬をきたしている状況にある。

【 0 0 0 5 】

非特許文献 1 には、平行平板電極を用いた V H F プラズマ C V D により、集積化タンデム型薄膜太陽電池用の結晶質 i 層膜の高品質、高速製膜に関する技術が示されている。

即ち、実験条件として、平行平板電極のサイズ：直径 10 c m、原料ガス：高水素希釈 S i H 4、圧力：2 ~ 4 T o r r（133 ~ 532 P a）、基板温度：250、電源周波数：60 M H z、投入電力：製膜速度 1.7 n m / s の場合、2.54 W / c m 2、2.5 n m / s の場合、3.4 W / c m 2 とすることにより、高品質の微結晶 S i が得られることが示されている。

また、1.7 ~ 2.5 n m / s という高速製膜条件においても、周波数 60 M H z の V H F プラズマ C V D を用いることにより、高品質の微結晶 S i が得られることが示されている。

なお、投入電力が、製膜速度 1.7 n m / s の場合、2.54 W / c m 2、2.5 n m / s の場合、3.4 W / c m 2 であり、非常に大きい電力が必要であるということは、例えば、基板面積が 110 c m x 140 c m（15400 c m 2）の場合、単純に比例計算すれば、製膜速度 1.7 n m / s の場合は 39.1 K W、2.5 n m / s の場合は 52.4 K W が必要であることを意味している。

【 0 0 0 6 】

非特許文献 2 には、平行平板電極を用いたプラズマ生成における電力消費に関する研究結果が示されている。

10

20

30

40

50

即ち、直径30cmの真空容器に設置された平行平板電極（サイズ：直径15cm、電極間隔：5cm）に13.56MHzの電力を、インピーダンス整合器を介して投入して、N₂プラズマの生成実験が行われ、投入された電力の消費量が測定されたことが示されている。

また、測定結果として、電源出力（300W）の約52%が平行平板電極間で消費され、残り48%はそれ以外の場所で消費（インピーダンス整合器12%、伝送回路24%、電極と真空容器内壁間などでの無効プラズマ生成12%）されることが示されている。

なお、上記のことは、平行平板電極を用いたRFプラズマCVD装置では、電源から投入された電力の中、目的とする電極間で消費されるのは約52%ということの意味している。

10

【0007】

非特許文献3には、後述の特許文献2に記載のラダー型電極を用いた大面積、均一のVHFプラズマ生成法を応用したプラズマCVD装置の開発研究に関する研究結果が示されている。

即ち、非特許文献3には、研究に使用されたプラズマCVD装置及び製膜実験の概要が示されている。実験に用いられた装置として、真空容器内に基板ヒータとラダー電極と裏板が離間して対向設置された構造を有するプラズマCVD装置が示されている。ラダー型電極（一平面内に同じ長さの2本の縦棒を設置し、その間を同じ長さの、複数の横棒で連結したもの）へのVHF電力の供給は、対向する二辺に設置された給電点から行われる。その際、二辺に供給される電力の電圧の位相差は時間的に変化させて、例えば正弦波状に

20

変化させて供給される。インピーダンス整合器の出力は、複数のT型同軸コネクタを用いて8分岐されて、8個の給電点に接続されている。両辺の給電点は合計16点である。また、実験結果として、電極の寸法は1.2m×1.5m、基板面積は1.1m×1.4mで、電源周波数60MHz、ラダー電極と基板ヒータの間隔20mm、圧力45Pa（0.338Torr）という条件で、アモルファスSiの製膜速度は1.7nm/sで、膜の不均一性は±18%が示されている。

【0008】

非特許文献4には、後述の特許文献3に記載のラダー型電極を用いた大面積、均一のVHFプラズマ生成法を応用したプラズマCVD装置の開発研究に関する研究結果が示されている。

30

即ち、非特許文献4には、研究に使用されたプラズマCVD装置及び製膜実験の概要が示されている。実験に用いられた装置として、真空容器内にラダー電極と接地電極が離間して対向設置された構造を有するプラズマCVD装置が示されている。ラダー型電極（一平面内に同じ長さの2本の縦棒を設置し、その間を同じ長さの、複数の横棒で連結したもの）へのVHF電力の供給は、対向する二辺に設置された給電点から行われる。その際、二辺に供給される電力の電圧の位相差は正弦波状に変化させて供給される。インピーダンス整合器と一方の辺に設置されている複数の給電点の間に、8分岐の電力分配器（Power Divider）が設置されている。

実験結果として、電極の寸法は1.25m×1.55m（棒の直径：10mm）、基板面積は1.1m×1.4mで、電源周波数60MHz、電圧の位相差は20KHzの正弦波、ラダー電極と基板ヒータの間隔20mm、圧力45Pa（0.338Torr）という条件で、アモルファスSiの製膜速度は0.5nm/sで、膜の不均一性は±15%が示されている。

40

【0009】

特許文献1には、ラダー型電極を用いたVHFプラズマCVD装置及びその方法に係わる発明が示されている。

即ち、特許文献1に記載の技術は、チャンバ内に放電電極と接地電極が対向するように設置されたプラズマCVD装置を用いた光電変換装置の製造方法であって、（A）前記放電電極に対向するように、p層を製膜した基板を前記接地電極に設置する工程と、（B）前記基板と前記放電電極との間の距離を8mm以下に設定する工程と、（C）前記基板を

50

前記接地電極に内蔵された加熱器により180～220 に加熱する工程と、(D)前記チャンパ内に材料ガスを供給する工程と、(E)前記チャンパ内の圧力を600 Pa～2000 Paに設定する工程と、(F)前記放電電極に超高周波電力を供給し前記材料ガスをプラズマ化することによって、前記基板に対して発電層を製膜する工程と、(G)前記発電層上にn層を製膜する工程と、を具備する光電変換装置の製造方法である。

また、特許文献1に記載の技術は、前記(F)工程において、前記超高周波電力のパワー密度は3.0 KW/m²以上であることを特徴とする。

また、特許文献1に記載の技術は、前記(F)工程において、前記超高周波電力の周波数は40 MHz以上であることを特徴とする。

また、製膜速度3～3.5 nm/sで、且つ、変換効率12～12.5%を得る条件として、圧力800 Paでパワー密度5～6 KW/m²のデータが示されている。

【0010】

特許文献2には、大面積で均一なVHFプラズマを生成する方法が示されている。

即ち、特許文献2に記載の技術は、単一の保持電極に保持された被処理基板と単一の放電電極とを放電容器内に離間させて対面配置し、該放電電極と被処理基板との間に実質的に均一な放電状態を広範囲に発生させる放電電極への給電方法であって、前記放電電極に複数の給電点を介して給電する際に、1つの給電点に供給される前記高周波電力の電圧波形の位相と、他の少なくとも1つの給電点に供給される前記高周波電力の電圧波形の位相との差を時間的に変化させることにより、前記放電電極内に生じる電圧分布を変化させ、これにより該電圧分布の単位時間当たりの平均値または単位時間当たりの積分値を実質的に均一なものとし、前期放電電極の電圧分布における定在波の発生を抑制することを特徴とする。

また、特許文献2に記載の技術は、前記放電電極がラダー型電極であることを特徴とする。

また、使用する高周波の周波数が30～800 MHzの範囲にあることを特徴とする。

【0011】

特許文献3には、ラダー型電極を用いて、大面積で均一なプラズマを生成する装置が示されている。

即ち、特許文献3に記載の技術は、プラズマ化学蒸着装置におけるプラズマ発生用のラダー型放電電極の構造であって、前記ラダー型放電電極の両端の給電部に第1の同一周波数の高周波を給電するサイクルと、第2の異なる周波数の高周波を給電するサイクルを有し、このサイクルを交互に切り替えて給電を行うように構成すると共に、前記放電電極の軸方向に対して垂直方向へクロスバーを付加し、定在波形状を変化させて発生するプラズマを均一化させたことを特徴とする。

また、特許文献3に記載の技術は、プラズマ化学蒸着装置におけるプラズマ発生用のラダー型放電電極の構造であって、前記ラダー型放電電極の両端の給電部に第1の同一周波数の高周波を給電するサイクルと、第2の異なる周波数の高周波を給電するサイクルを有し、このサイクルを交互に切り替えて給電を行うように構成すると共に、前記放電電極の軸方向に対して垂直方向へクロスバーを付加し、且つ、定在波波長を増加させる範囲で前記ラダー型放電電極径を小さくし、発生するプラズマを均一化させたことを特徴とする。

また、特許文献3に記載の技術は、プラズマ化学蒸着装置におけるプラズマ発生用のラダー型放電電極の構造であって、前記ラダー型放電電極の両端の給電部に第1の同一周波数の高周波を給電するサイクルと、第2の異なる周波数の高周波を給電するサイクルを有し、このサイクルを交互に切り替えて給電を行うように構成すると共に、前記放電電極を軸方向に対して垂直方向に複数に分割し、放電電極左右方向の電力バランスを図ってプラズマ密度の偏重を低減するようにしたことを特徴とする。

【0012】

特許文献4には、一对の電極間に2つの定在波を時間的に交互に発生させることにより、大面積で均一なVHFプラズマを生成することが可能な方法が示されている。

即ち、特許文献4に記載の技術は、内部に基板がセットされる、排気系を備えた真空容

10

20

30

40

50

器と、この真空容器内に放電用ガスを供給する放電用ガス供給系と、プラズマを生成する第1及び第2の電極から成る一対の電極と、任意のパルス変調が可能で、かつ、2出力でかつ該2出力の電圧の位相差を任意に設定可能な第1の高周波電源及び該第1の高周波電源の2つの出力端子に接続された第1及び第2のインピーダンス整合器及び該第1の高周波電源のパルス変調信号に同期した任意のパルス変調が可能で、かつ、2出力でかつ該2出力の電圧の位相差を任意に設定可能な第2の高周波電源及び該第2の高周波電源の2つの出力端子に接続された第3及び第4のインピーダンス整合器から成る電力供給系と、を具備し、生成したプラズマを利用して基板の表面を処理するプラズマ表面処理方法であって、前記第1の高周波電源の2つの出力により該一対の電極間に生成される第1の定在波の腹の位置と前記第2の高周波電源の2つの出力により該一対の電極間に生成される第2の定在波の腹の位置の距離を使用電力の波長の四分の一、即ち $\lambda/4$ に設定することを特徴とするプラズマ表面処理方法である。

10

また、特許文献4に記載の技術は、内部に基板がセットされる、排気系を備えた真空容器と、この真空容器内に放電用ガスを供給する放電用ガス供給系と、プラズマを生成する第1及び第2の電極から成る一対の電極と、任意のパルス変調が可能で、かつ、2出力でかつ該2出力の電圧の位相差を任意に設定可能な第1の高周波電源及び該第1の高周波電源の2つの出力端子に接続された第1及び第2のインピーダンス整合器及び該第1の高周波電源のパルス変調信号に同期した任意のパルス変調が可能で、かつ、2出力でかつ該2出力の電圧の位相差を任意に設定可能な第2の高周波電源及び該第2の高周波電源の2つの出力端子に接続された第3及び第4のインピーダンス整合器から成る電力供給系と、を具備し、生成したプラズマを利用して基板の表面を処理するプラズマ表面処理方法であって、前記第1の高周波電源の2つの出力の位相差と前記基板表面に製膜される正弦的な膜厚分布を有するSi系膜の膜厚が最大になる位置との関係を把握する第1の工程と、前記第2の高周波電源の2つの出力の位相差と前記基板表面に製膜される正弦的な膜厚分布を有するSi系膜の膜厚が最大になる位置との関係を把握する第2の工程と、該第1及び第2の工程でそれぞれに把握された第1及び第2の高周波電源の2つの出力の位相差と該膜厚が最大になる位置との関係より該第1及び第2の高周波電源の2つの出力の位相差を設定することにより、該基板に目的のSi系膜を製膜する第3の工程から成ることを特徴とするプラズマ表面処理方法である。

20

なお、上記第1の定在波と第2の定在波が一対の電極間の発生し、且つ、両者の腹の間隔が使用電力の波長の四分の一であれば、一対の電極間の電力の強さ $I(x)$ は、次のようになり、周波数に関係なく一様(一定値)になる。

30

$$I(x) = \cos^2(2x/\lambda + \phi/2) + \sin^2(2x/\lambda + \phi/2)$$
ただし、 x は供給電力の伝播方向での距離、 λ は使用電力の波長、 ϕ は給電点での初期位相差である。

【0013】

特許文献5には、電力供給回路におけるインピーダンス整合器と電極上の給電点の間に平衡不平衡変換装置を設置する技術に関する装置及び方法が示されている。

即ち、特許文献5に記載の技術は、排気系を備えた真空容器と、この真空容器内に放電用ガスを供給する放電用ガス供給系と、プラズマ生成用の電極と、高周波電源とインピーダンス整合器と平衡不平衡変換装置から成る電力供給系と、プラズマ処理すべき基板を配置する基板保持手段とを具備し、生成したプラズマを利用して基板の表面を処理するプラズマ表面処理装置に用いられる平衡伝送回路であって、2本の長さが略等しい同軸ケーブルの外部導体同士が少なくともそれぞれの両端部で短絡され、かつ、該2本の同軸ケーブルの一方の端部のそれぞれの芯線を入力部とし、他方の端部のそれぞれの芯線を出力部とするという構成を有することを特徴とする平衡伝送回路である。

40

また、特許文献5に記載の技術は、排気系を備えた真空容器と、この真空容器内に放電用ガスを供給する放電用ガス供給系と、プラズマ生成用の電極と、高周波電源とインピーダンス整合器と平衡不平衡変換装置から成る電力供給系と、プラズマ処理すべき基板を配置する基板保持手段とを具備し、生成したプラズマを利用して基板の表面を処理するプラ

50

ズマ表面処理装置に用いられる平衡伝送回路であって、2本の長さが略等しい同軸ケーブルの外部導体同士が少なくともそれぞれの両端部で他の導体により短絡され、かつ、該2本の同軸ケーブルの一方の端部のそれぞれの芯線を入力部とし、他方の端部のそれぞれの芯線を出力部とするという構成を有することを特徴とする平衡伝送回路である。

また、特許文献5に記載の技術は、排気系を備えた真空容器と、この真空容器内に放電用ガスを供給する放電用ガス供給系と、プラズマを生成する第1及び第2の電極からなる一对の電極と、高周波電源とインピーダンス整合器と平衡不平衡変換装置から成る電力供給系と、プラズマ処理すべき基板を配置する基板保持手段とを具備し、生成したプラズマを利用して基板の表面を処理するプラズマ表面処理装置において、前記一对の電極に複数の開口を設置し、該一对の電極のそれぞれの周縁に電力供給点を配置し、かつ、上記の構成を有する平衡伝送回路を用いて、前記電力供給系構成部材の平衡不平衡変換装置の出力回路と該一对の電極の電力供給点を接続するという構成を有することを特徴とするプラズマ表面処理装置である。

10

また、特許文献5に記載の技術は、排気系を備えた真空容器と、この真空容器内に放電用ガスを供給する放電用ガス供給系と、プラズマを生成する第1及び第2の電極からなる一对の電極と、該一对の電極の電力供給点と、高周波電源とインピーダンス整合器と平衡不平衡変換装置から成る電力供給系と、プラズマ処理すべき基板を配置する基板保持手段と、上記の構成を有する平衡伝送回路を具備し、生成したプラズマを利用して基板の表面を処理するプラズマ表面処理装置において、前記電力供給系から前記一对の電極へ電力を供給する電力供給回路の装置構成は、電力の流れの上流側から下流側に沿って、高周波電源、インピーダンス整合器、平衡不平衡変換装置、平衡伝送回路および電力供給点の順序に配置させることを特徴とするプラズマ表面処理装置である。

20

また、特許文献5には、従来の平行平板電極を用いたプラズマCVD装置及びラダー型電極を用いたプラズマCVD装置は、その装置に用いられている電極への給電部において、漏洩電流が発生し、異常放電あるいはアーキングが発生すること、及び一对の電極以外の場所でプラズマが発生し、均一な製膜が困難であることが指摘されている。

即ち、従来のプラズマCVD装置では、電力供給用の同軸ケーブルと電極との接続部は、互いに異なる構造の線路が接続された形になっており、その接続部では漏洩電流が発生する。なお、同軸ケーブルは内部導体(芯線)及び外部導体の内面を、それぞれ往路及び帰路とする伝送方式であり、一对の電極は2本の平行線路に相当する構造である。

30

ここに示される漏洩電流の概念は図14に示す通りである。同図において、同軸ケーブル108の芯線から一对の電極107a、107b側へ流れる電流Iは、一对の電極間を流れて戻る電流I1と、該一对の電極間を流れないでそれ以外を流れて戻る電流I2に分割される。電流I2が漏洩電流である。なお、図14に示される電流は、ある瞬間を概念的に示しており、交流現象なので、当然、図示されている電流の大きさと方向は時間的に変化する。

また、上記漏洩電流に起因する異常放電あるいはアーキングの防止のために、図15に示す平衡不平衡変換装置201及び2本の同軸ケーブル205a、205bで構成される平衡伝送回路を組み合わせた装置が用いられることが示されている。図15において、電力伝送用同軸ケーブル200の端部の芯線と外部導体が平衡不平衡変換装置201の入力端子202a、202bに接続され、その出力端子203a、203bは、2本の同軸ケーブル205a、205bで構成される平衡伝送回路の入力部の芯線に接続される。該2本の同軸ケーブル205a、205bの両端部の外部導体は短絡されている。そして、該平衡伝送回路の出力部の芯線は付加207に接続される。

40

該平衡伝送回路は該2本の同軸ケーブル205a、205bの外部導体同士が短絡されて、閉ループを形成しているため、電流の漏洩はない。その結果、該平衡不平衡変換装置201の出力電流Iは漏洩することなく、付加207に供給可能である。

【0014】

【特許文献1】特開2006-216921(第6図、第9、10図)

【特許文献2】特許第3316490号(第1-3図、第6、7図)

50

【特許文献3】特許第3611309号(第14図)

【特許文献4】特開2005-123203(第1-4図、第8、9図)

【特許文献5】特許第3590955号(第18図、第15-17図)

【0015】

【非特許文献1】M. Kondo, M. Fukawa, L. Guo, A. Matsuda: High rate growth of microcrystalline silicon at low temperatures, Journal of Non-Crystalline Solids 266-269(2000)、84-89.

【非特許文献2】J. A. Baggerman, R. J. Visser, and E. J. H. Collart: Power dissipation measurement in a low-pressure N₂ radio-frequency discharge, J. Appl. Phys., Vol. 76, No. 2, 15 July 1994, 738-746.

10

【非特許文献3】H. Takatsuka, Y. Yamauchi, K. Kawamura, H. Mashima, Y. Takeuchi: World's largest amorphous silicon photovoltaic module, Thin Solid Films 506-507(2006)、13-16.

【非特許文献4】K. Kawamura, H. Mashima, Y. Takeuchi, A. Takano, M. Noda, Y. Yonekura, H. Takatsuka: Development of large-area a-S:H films deposition using controlled VHF plasma, Thin Solid Films 506-507(2006)、22-26.

20

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0016】

本発明者は、上記集積化タンデム型薄膜太陽電池の製造に用いられるプラズマCVD装置に関する問題として、上記非特許文献1~4及び特許文献1~5に指摘されている問題点以外に、上記集積化タンデム型薄膜太陽電池の製造分野における特有の下記問題があることを発見した。

即ち、上記集積化タンデム型薄膜太陽電池の製造分野においては、下記(い)~(ほ)の事項を満たすことができるプラズマCVD装置及び方法が求められているが、(い)以外の事項については、それに対応できる装置及び技術が確立されていない。

30

下記(ろ)~(ほ)に関するプラズマCVD装置及び方法の創出は、集積化タンデム型薄膜太陽電池の製造に関して、再現性の良い生産、歩留まりの良い生産及び生産コスト低減を図る上での重要な課題である。

上記集積化タンデム型薄膜太陽電池の製造分野において求められる事項は次の通りである。

(い) 高速製膜が可能で、且つ、高品質の結晶質i層膜を形成可能であること。例えば、製膜速度2nm/s以上で、且つ、製造された膜のラマンスペクトル特性が良好であること。

40

(ろ) 基板面積1m×1m程度以上の大面積基板において、高速で、均一性の良い高品質i層膜を形成可能であること。例えば、基板面積1.1m×1.4m、製膜速度2nm/s以上、膜厚みの不均一性±10%以下であること(不均一性±10%程度以上である場合、集積化タンデム型薄膜太陽電池の製造工程の中のレーザ加工工程において、レーザによる膜加工の精度を確保することが困難となり、電池性能及び歩留まりの確保が困難となる)。

(は) 電力の給電部の近傍で、異常放電(アーキング)が発生しないこと。

(に) 供給電力が高品質の結晶質i層膜の形成に有効に使用されること、即ち、基板が設置される接地電極と非接地電極間のみならず、プラズマが生成され、その一対の電極間以外では、プラズマが生成されないこと。

50

(ほ) 供給電力を供給する伝送線路で消費される電力が少ないこと。

なお、上記異常放電(アーキング)及び一対の電極間以外でのプラズマ生成に起因する電力損失及び上記電力伝送線路での電力損失が大きい場合、集積化タンデム型薄膜太陽電池の生産ラインにおけるランニングコストが増大し、製品製造コストの低減が困難になる。

【0017】

以下に、従来の代表的なプラズマCVD装置である平板型電極を用いるプラズマCVD装置及びラダー型電極を用いるプラズマCVD装置における問題等を説明する。

【0018】

まず、薄膜シリコン太陽電池の分野での代表的プラズマCVD装置である平行平板型電極を用いるプラズマCVD装置の構成及び技術の概要であるが、例えば非特許文献1及び2に記載されているようなものである。

この装置では、非接地の平板型電極と、接地された平板型電極が対向して設置され、その間に原料ガスを供給するとともに、電力を供給してプラズマを発生させ、予め上記接地電極上に設置された基板にシリコン系の膜を堆積させる。

この場合、電力を電極に供給する同軸ケーブルの芯線と非接地電極とが接続される給電点は、該非接地電極の裏側の面に設けられる。なお、裏側の面とは、非接地電極の2つある面の中の、該非接地電極と接地電極の間に生成されるプラズマ側から見て裏側にある面のことである。

上記給電点から電磁波(波動)として伝播する電力波は、上記非接地電極の裏側の面にある一点から上記非接地電極と真空容器の壁の間の空間(あるいは、アースシールドが設置されている場合は、上記非接地電極とアースシールドの間の空間)を伝播し、上記電極間に到達する。そして、その電極間にプラズマを生成する。

上記の構造を有する平行平板型電極を用いるプラズマCVD装置は、使用電力の周波数が10MHz - 30MHz帯域及びVHF帯域(30MHz - 300MHz)になると、電力損失及び電極間以外に発生する不必要なプラズマの発生という問題が発生することに加えて、制御することが困難な定在波が電極間に発生し、一様なプラズマの生成が困難という問題があることから、基板面積1m x 1m級の大面積基板を対象にしたVHFプラズマCVD装置は実用化されていない。

【0019】

非特許文献1には、集積化タンデム型薄膜太陽電池用の結晶質i層膜の高品質、高速製膜を行う際、投入電力は、製膜速度1.7nm/sの場合、2.54W/cm²、2.5nm/sの場合、3.4W/cm²であることが示されている。

この数値は、例えば、基板面積が110cm x 140cm(15400cm²)の場合、単純に比例計算すれば、製膜速度1.7nm/sの場合は39.1KW、2.5nm/sの場合は52.4KWが必要である。

VHFの電源装置は、出力5~10KW程度のもので、装置購入額は8000万円~1億円と高価である。仮に、出力が上記39.1KWあるいは52.4KWであれば、4億円~5億円と非常に高価な装置となる。

実際の生産ラインでは、上記のような非常に高価な装置の導入は、製品コストの大幅な増大となるので、上記の平行平板型電極を用いるプラズマCVD装置及び上記製膜条件は採用することは困難である。

また、仮に、集積化タンデム型薄膜太陽電池用の結晶質i層膜の生産ラインに、基板面積110cm x 140cm、2.5nm/sで、52.4KWという条件を選定した場合を考えると、次に示すような電力使用量及び電力料金が必要となる。

上記生産ラインの稼働率を85%とすると、結晶質i層膜の製膜室の1室のみで、年間電力消費量は、52.4KW x 365日 x 24時間/日 x 0.85 = 390170.4KWhとなる。電気代は、1KWh当たり20円とすれば、約780万円となる(1KWh当たり15円としても、約585万円となる)。

実際の生産ラインでは、上記のような膨大な電気代は、製品コストの増大となるので、

10

20

30

40

50

上記の平行平板型電極を用いるプラズマCVD装置及び上記製膜条件は採用することは困難である。

【0020】

非特許文献2に示されている研究結果によれば、電源出力の約52%が平行平板電極間で消費され、残り48%はそれ以外の場所で消費（インピーダンス整合器12%、伝送回路24%、電極と真空容器内壁間などでの無効プラズマ生成12%）されるとのことである。

即ち、太陽電池用の発電膜の製造への応用では、発電膜製造に有効に消費されるのは約52%であり、約48%は無駄（あるいは有害）な電力として捨てられることを、意味している。

非特許文献2の研究結果で、非特許文献1に記載の消費電力を考えると、上記生産ライン用の結晶質i層膜の製膜室の1室のみでの、年間電力消費量 $52.4\text{KW} \times 365\text{日} \times 24\text{時間/日} \times 0.85 = 390170.4\text{KWh}$ の48%、即ち、 187282KWh が、無駄（あるいは有害）な電力として捨てられることを、意味する。

【0021】

上記のように、従来の平行平板型電極を用いるプラズマCVD装置には、電力損失及び電極間以外に発生する不必要なプラズマの発生という問題がある。

なお、非特許文献1及び2の具体的な数値に、仮に誤差が含まれているとしても、電力損失問題の存在は否定できないと考えられる。

【0022】

次に、ラダー型電極を用いるプラズマCVD装置においては、製膜される半導体膜の厚み分布が均一にならないという問題と、以下に説明するような電力損失問題がある。

この装置では、例えば、非特許文献3、非特許文献4、特許文献1、特許文献2及び特許文献3に記載されているように、真空容器内に接地電極を兼ねる基板ヒータと、非接地のラダー電極と、該ラダー電極の裏側（基板ヒータ側から見て）に設置の裏板と、が離間して対向設置される。ラダー型電極とは、一平面内に同じ長さの2本の縦棒を設置し、その間を同じ長さの、複数の横棒で連結したものである。

原料ガスは、ラダー型電極から噴出される場合と、裏板から噴出される場合があり、いずれもラダー型電極でプラズマ化されて、予め基板ヒータ上に設置された基板にシリコン系の膜を堆積させる。

電力を電極に供給する同軸ケーブルの芯線と非接地電極とが接続される給電点は、ラダー電極の外周部で、且つ、互いに対向した地点に設定される。

上記給電点から電磁波（波動）として伝播する電力波は、ラダー電極と基板ヒータ間の空間、及び該ラダー電極と裏板間の空間を伝播し、その空間に、それぞれにプラズマを生成する。即ち、本装置ではラダー電極の両面においてプラズマが生成されるという特徴がある。

この場合、互いに対向した給電点から供給される電力の電圧の位相差は時間的に変化させて、例えば周波数1KHzの正弦波状に変化させて供給される。その結果、ラダー電極と基板ヒータ間の空間及び該ラダー電極と裏板間の空間には、上記の互いに対向した給電点の間を、例えば1KHzの速さで往復するように動く定在波が発生する。

この装置及び方法では、上記動く定在波の効果により、基板面積 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 程度以上の大面積基板を対象に、均一なVHFプラズマの生成が可能とされている。

非特許文献3によれば、電極の寸法 $1.2\text{m} \times 1.5\text{m}$ 、基板面積 $1.1\text{m} \times 1.4\text{m}$ で、電源周波数60MHz、ラダー電極と基板ヒータの間隔20mm、圧力45Pa（0.338Torr）という条件で、アモルファスSiの製膜速度は 1.7nm/s で、膜の不均一性は $\pm 18\%$ が示されている。

非特許文献4によれば、電極の寸法 $1.25\text{m} \times 1.55\text{m}$ （棒の直径：10mm）、基板面積 $1.1\text{m} \times 1.4\text{m}$ で、電源周波数60MHz、電圧の位相差は20KHz正弦波、ラダー電極と基板ヒータの間隔20mm、圧力45Pa（0.338Torr）という条件で、アモルファスSiの製膜速度は 0.5nm/s で、膜の不均一性は $\pm 15\%$ が

10

20

30

40

50

示されている。

【 0 0 2 3 】

ラダー型電極を用いるプラズマ C V D 装置に関する電力損失と、電極間以外に発生する不必要なプラズマの発生という問題については、上記非特許文献 3、非特許文献 4、特許文献 1、特許文献 2 及び特許文献 3 には記載されていない。

しかしながら、非特許文献 3、非特許文献 4、特許文献 1、特許文献 2 及び特許文献 3 に記載されている装置の構造を見ると、以下に示すように、電力損失及び電極間以外に発生する不必要なプラズマの発生という問題が存在していることが、容易に指摘される。

第 1 に、電極及び給電方法に起因する無駄な電力消費の問題がある。それは、ラダー電極を用いたプラズマ生成装置はラダー電極の両面に生成されるプラズマを利用する両面放電方式であるが、実際には、両面に基板を設定しないで、一方の面の放電が利用されている。したがって、他方の面の放電は無効放電、即ち、不必要なプラズマの発生という問題を抱えているといえる。その結果、給電点から供給される電力全体の約 30% ~ 40% の電力を無駄に消費していると見られる。即ち、無駄なプラズマ発生という電力損失問題を抱えている。

なお、上記両面放電方式、即ち、両面に基板を設定する方式は、実際には両面プラズマの安定した生成の制御が困難であることから、ラダー電極を用いる装置に限らず、平行平板型プラズマ C V D 装置でも、余り採用されていないようである。

第 2 に、上記第 1 の問題に起因するもので、不必要なプラズマの発生に起因するパウダー及びパーティクルの発生という問題を抱えている。この問題は、生産ラインの装置稼働率の低下、製造する発電膜の性能低下というトラブルの誘引要因となる重要な問題である。

第 3 には、基板面積 1 m x 1 m 程度以上の大面積基板を対象にした場合、均一な V H F プラズマの発生の為に、上記給電点が複数設置される。この複数設置された給電点に電力を供給する電力伝送回路に、複数の T 型同軸コネクタが用いられる電力分配回路が用いられている。例えば、非特許文献 3 では、ラダー電極の一方の端部の給電に、7 個の T 型同軸コネクタが用いられて 8 分岐されている。この分岐手段は、同軸ケーブルと T 型同軸コネクタとの接続部で電力損失が発生する。

一般的に、V H F 領域の電力伝送では、その接続部で、2 ~ 3% の電力損失があることが知られている。仮に、その損失を 3% とすると、T 型同軸コネクタによる電力損失は、3% x 7 個 x 2 (両端部) = 42% になる。この数値は実際の生産ラインでは、極めて大きく、問題である。

なお、非特許文献 4 には、電力分配器 (P o w e r D i v d e r) が用いられているが、一般的には、電力分配器も分岐数が多くなると、電力分配器内部での電力損失は 10 ~ 15% であり、問題になる数値であるといえる。

【 0 0 2 4 】

次に、特許文献 4 に記載の技術であるが、2 出力で、且つ、その出力の電圧の位相を任意に設定可能なパルス変調方式の第 1 の高周波電源と、該第 1 の高周波電源の出力の発信時間帯と異なる時間帯に発信され、且つ、2 出力で、且つ、その出力の電圧の位相を任意に設定可能なパルス変調方式の第 2 の高周波電源を用いて、それぞれ、第 1 の定在波及び第 2 の定在波を発生させ、且つ、その 2 つ定在波の腹の位置を波長の四分の一に設定することにより、一対の電極間に均一なプラズマを生成するものである。

即ち、使用される電力の波長を λ 、上記電力の伝播方向を x 、位相差を ϕ とすれば、一対の電極に生成される第 1 の定在波及び第 2 の定在波の強さは、

$$\text{第 1 の定在波} = c o s^2 \left\{ 2 \pi x / \lambda + \phi / 2 \right\}$$

$$\text{第 2 の定在波} = s i n^2 \left\{ 2 \pi x / \lambda + \phi / 2 \right\}$$

$$\text{第 1 の定在波} + \text{第 2 の定在波} = c o s^2 \left\{ 2 \pi x / \lambda + \phi / 2 \right\} + s i n^2 \left\{ 2 \pi x / \lambda + \phi / 2 \right\} = 1$$

一般に、電力の強さとプラズマの強さは比例関係にあるので、プラズマの強さ $I(x)$ は、次のように表される。

$$I(x) = \cos^2 \{ 2x / \lambda + \pi / 2 \} + \sin^2 \{ 2x / \lambda + \pi / 2 \}$$

$$= 1 \cdot \cdot$$
 (使用する電力の波長 λ に依存されないで、一様なプラズマの生成が可能であることを意味する)

しかしながら、上記集積化タンデム型薄膜太陽電池の製造分野において求められる高周波プラズマCVD装置及び方法の満たすべき条件の中の、(に)供給電力が高品質の結晶質i層膜の形成に有効に使用されること、即ち、基板が設置される接地電極と非接地電極間のみならずプラズマが生成され、その一对の電極間以外での有害のプラズマが生成されないこと、また、給電回路と電極の接続部近傍で、異常放電(アーキング)が発生しないこと、及び(ほ)供給電力を供給する伝送回路で消費される電力が少ないことについては、記載されていない。

10

即ち、特許文献4に記載の技術においては、同軸ケーブルの端部と給電点との接続部で発生する漏洩電流に起因する電力損失の問題を抱えていると言える。

【0025】

次に、特許文献5に記載の技術であるが、電力供給回路におけるインピーダンス整合器と電極上の給電点の間に平衡不平衡変換装置を設置され、該平衡不平衡変換装置と一对の電極の給電点が、2本の長さが略等しい同軸ケーブルの外部導体同士が少なくともそれぞれの両端部で短絡され、かつ、該2本の同軸ケーブルの一方の端部のそれぞれの芯線を入力部とし、他方の端部のそれぞれの芯線を出力部とするという構成になっていることから、従来技術で問題である電力給電部での漏洩電流や異常放電等を抑制可能である。その結果、電力損失問題を効果的に解決できる。

20

また、大面積プラズマの均一化に関しても、給電部での異常放電等を抑制可能であることから、効果的であることが記載されている。

しかしながら、特許文献5に記載の技術のみでは、プラズマの大面積化及び均一化の応用は實際上、困難である。その結果、給電部での異常放電等を抑制する装置としての応用に限定される。

即ち、上記集積化タンデム型薄膜太陽電池の製造分野において求められる高周波プラズマCVD装置及び方法の満たすべき条件の中の、(ろ)基板面積1m×1m程度以上の大面積基板において、高速で、均一性の良い高品質i層膜を形成可能であることに関する問題があると言える。

【0026】

30

以上説明したように、従来技術では、上記(い)～(ほ)の事項を全て満足させることは不可能である。

言い換えれば、従来の高周波プラズマCVD技術分野が抱える具体的技術課題は、第1に、異常放電の発生を抑制すると共に、一对の電極間のみならずプラズマを生成可能で、且つ、大面積・均一化が可能な技術の創出、第2に、電力伝送線路での電力損失を抑制可能な技術の創出である。

【0027】

そこで、本発明は、プラズマ表面処理の高速化・大面積化・均一化が可能であると共に、異常放電の発生及び給電される電力の損失を抑制し、且つ、一对の電極間のみならずプラズマを生成可能な技術のアイデアを創出し、該アイデアを実現するための高周波プラズマCVD装置及びプラズマCVD法を提供することを目的とする。

40

【課題を解決するための手段】

【0028】

以下に、本発明を実施する為の最良の形態で使用される番号・符号を用いて、問題を解決する為の手段を説明する。これらの番号・符号は、特許請求の範囲の記載と発明を実施する為の最良の形態との対応関係を明らかにするために括弧付きで付加したものである。

ただし、それらの番号・符号を、特許請求の範囲に記載されている発明の技術的範囲の解釈に用いてはならない。

【0029】

本願に係わる第1の発明の高周波プラズマCVD装置は、プラズマを利用して真空容器

50

(1)に配置される基板(11)の表面に薄膜を形成する高周波プラズマCVD装置において、電極(2)の一方の端部に配置された第1の給電点と該第1の給電点(20a)と電力波の伝播上での対向点となる関係にある他方の端部に配置された第2の給電点(20b)との間隔が、使用電力の波長短縮率を考慮した波長 λ の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N \cdot \lambda / 4$ に設定され、互いに独立の関係にある第1の定在波と第2の定在波が発生されるとともに、該第1の定在波の腹の位置と第2の定在波の腹の位置の間隔が該使用電力の波長短縮率を考慮した波長 λ の四分の一に設定される高周波電力供給手段(25a、25b、28a、28b、29a、29b、30a、30b、31a、31b、32a、32b、33a、33b、34a、34b)を有することを特徴とする。

【0030】

なお、波長短縮率を考慮した使用電力の波長 λ とは、プラズマが生成された一对の電極(2、4)間を電力が伝播する際の波長 λ のことである。一般的に、波長短縮率を考慮した使用電力の波長 λ は、使用電力が真空中を伝播する際の波長 λ_0 より短い。また、一般的に、シランガスのプラズマの場合、波長 λ と波長 λ_0 との比、即ち、 λ / λ_0 は、圧力が約40~530Pa(0.3~4 Torr)で、プラズマ密度が約 $4 \sim 6 \times 10^9 / \text{cm}^3$ であり、 $\lambda / \lambda_0 =$ 約0.6である。圧力が530~1333Pa(4~10 Torr)の場合、プラズマ密度が約 $6 \sim 10 \times 10^9 / \text{cm}^3$ であり、 $\lambda / \lambda_0 =$ 約0.5~0.55である。

【0031】

本願に係わる第2の発明の高周波プラズマCVD装置は、プラズマを利用して真空容器(1)に配置される基板(11)の表面に薄膜を形成する高周波プラズマCVD装置において、電極(2)の一方の端部に配置された第1の給電点(20a)と該第1の給電点と電力波の伝播上での対向点となる関係にある他方の端部に配置された第2の給電点(20b)との間隔が、使用電力の波長短縮率を考慮した波長 λ の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N \cdot \lambda / 4$ に設定され、腹の位置が該第1及び第2の給電点のいずれか一方にあって節の位置が他方にある第1の定在波と、該第1の定在波の場合と位置関係が逆になる位置に腹と節がある第2の定在波を時間的に交互に発生させる高周波電力供給手段(25a、25b、28a、28b、29a、29b、30a、30b、31a、31b、32a、32b、33a、33b、34a、34b)を有することを特徴とする。

【0032】

本願に係わる第3の発明の高周波プラズマCVD装置は、プラズマを利用して真空容器(1)に配置される基板(11)の表面に薄膜を形成する高周波プラズマCVD装置において、電極(2)の一方の端部に配置された第1の給電点(20a)と該第1の給電点と電力波の伝播上での対向点となる関係にある他方の端部に配置された第2の給電点(20b)との間隔が、使用電力の波長短縮率を考慮した波長 λ の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N \cdot \lambda / 4$ に設定され、腹の位置が該第1及び第2の給電点を結ぶ線分の中間地点にある第1の定在波と、節の位置が該中間地点にある第2の定在波を時間的に交互に発生させる高周波電力供給手段(25a、25b、28a、28b、29a、29b、30a、30b、31a、31b、32a、32b、33a、33b、34a、34b)を有することを特徴とする。

【0033】

本願に係わる第4の発明の高周波プラズマCVD装置は、プラズマを利用して真空容器(1)に配置される基板(11)の表面に薄膜を形成する高周波プラズマCVD装置において、電極(2)の端部に配置された第1の給電点(20a)と該第1の給電点と電力波の伝播上での対向点となる関係にある位置に配置された第2の給電点(20b)との間隔が、使用電力の波長短縮率を考慮した波長 λ の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N \cdot \lambda / 4$ に設定され、互いに独立の関係にある第1の定在波と第2の定在波が発生されると共に、該第1の定在波の腹の位置と第2の定在波の腹の位置の間隔が該使用電力の波長短縮率を考慮した波長 λ の四分の一に設定される高周波電力供給手段(25a、25b、28a、28b、29a、29b、30a、30b、31a、31b、32a、32b、33a、33

10

20

30

40

50

b、34a、34b)を有し、且つ、非平衡電力伝送路を平衡電力伝送路に変換する平衡非平衡変換装置(40a、40b)を有することを特徴とする。

【0034】

本願に係わる第5の発明の高周波プラズマCVD装置は、プラズマを利用して真空容器(1)に配置される基板(1)の表面に薄膜を形成する高周波プラズマCVD装置において、電極(2)の端部に配置された第1の給電点(20a)と該第1の給電点と電力波の伝播上での対向点となる関係にある位置に配置された第2の給電点(20b)との間隔が、使用電力の波長短縮率を考慮した波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定され、且つ、腹の位置が該第1及び第2の給電点のいずれか一方にあって節の位置が他方にある第1の定在波と、該第1の定在波の場合と位置関係が逆になる位置に腹と節がある第2の定在波を時間的に交互に発生させる高周波電力供給手段(25a、25b、28a、28b、29a、29b、30a、30b、31a、31b、32a、32b、33a、33b、34a、34b)を有し、且つ、非平衡電力伝送路を平衡電力伝送路に変換する平衡非平衡変換装置(40a、40b)を有することを特徴とする。

10

【0035】

本願に係わる第6の発明の高周波プラズマCVD装置は、プラズマを利用して真空容器(1)に配置される基板(11)の表面に薄膜を形成する高周波プラズマCVD装置において、電極(2)の端部に配置された第1の給電点(20a)と該第1の給電点と電力波の伝播上での対向点となる関係にある位置に配置された第2の給電点(20b)との間隔が、使用電力の波長短縮率を考慮した波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定され、且つ、腹の位置が該第1及び第2の給電点を結ぶ線分の中間地点にある第1の定在波と、節の位置が該中間地点にある第2の定在波を時間的に交互に発生させる高周波電力供給手段(25a、25b、28a、28b、29a、29b、30a、30b、31a、31b、32a、32b、33a、33b、34a、34b)を有し、且つ、非平衡電力伝送路を平衡電力伝送路に変換する平衡非平衡変換装置(40a、40b)を有することを特徴とする。

20

【0036】

本願に係わる第7の発明のプラズマCVDによる半導体薄膜製造法は、電源周波数がVHF領域(30~300MHz)である高周波プラズマCVD装置を用いた薄膜シリコン系太陽電池用の半導体薄膜製造法において、前記高周波プラズマCVD装置として本願に係わる第1ないし6のいずれか1つの発明の高周波プラズマCVD装置を用いて、薄膜シリコン系太陽電池用の半導体薄膜を製造することにより一様な半導体薄膜が製造可能となることを特徴とする。

30

【0037】

本願に係わる第8の発明の高周波プラズマCVD法は、電源の周波数がVHF領域(30~300MHz)であるプラズマを利用して真空容器(1)に配置される基板(11)の表面に薄膜を形成する高周波プラズマCVD法において、非接地電極(2)の一方の端部に第1の給電点(20a)を配置し、該非接地電極の他方の端部で、且つ、該第1の給電点と電力波の伝播上での対向点となる関係にある位置に第2の給電点(20b)を配置させると共に、該第1及び第2の給電点を結ぶ方向の該電極の長さを使用電力の波長短縮率を考慮した波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定し、且つ、互いに独立の関係にある第1の定在波と第2の定在波を発生させ、該第1の定在波の腹の位置と第2の定在波の腹の位置の間隔を使用電力の波長短縮率を考慮した波長の四分の一に設定させることにより一様なプラズマが生成可能となることを特徴とする。

40

【0038】

本願に係わる第9の発明の高周波プラズマCVD法は、電源の周波数がVHF領域(30~300MHz)であるプラズマを利用して真空容器(1)に配置される基板(11)の表面に薄膜を形成する高周波プラズマCVD法において、非接地電極(2)の一方の端部に第1の給電点(20a)を配置し、該非接地電極の他方の端部で、且つ、該第1の給電点と電力波の伝播上での対向点となる関係にある位置に第2の給電点(20b)を配置

50

させると共に、該第1及び第2の給電点を結ぶ方向の該電極の長さを使用電力の波長短縮率を考慮した波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定し、且つ、腹の位置が該第1及び第2の給電点のいずれか一方にあって節の位置が他方にある第1の定在波と、該第1の定在波の場合と位置関係が逆になる位置に腹と節がある第2の定在波を時間的に交互に発生させることにより一様なプラズマが生成可能となることを特徴とする。

【0039】

本願に係わる第10の発明の高周波プラズマCVD法は、電源の周波数がVHF領域(30~300MHz)であるプラズマを利用して真空容器(1)に配置される基板(11)の表面に薄膜を形成する高周波プラズマCVD法において、非接地電極(2)の一方の端部に第1の給電点(20a)を配置し、該非接地電極の他方の端部で、且つ、該第1の給電点と電力波の伝播上での対向点となる関係にある位置に第2の給電点(20b)を配置させると共に、該第1及び第2の給電点を結ぶ方向の該電極の長さを使用電力の波長短縮率を考慮した波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定し、且つ、腹の位置が該第1及び第2の給電点を結ぶ線分の中間地点にある第1の定在波と、腹の位置が該中間地点にある第2の定在波を時間的に交互に発生させることにより一様なプラズマが生成可能となることを特徴とする。

10

【0040】

本願に係わる第11の発明の高周波プラズマCVD法は、電源の周波数がVHF領域(30~300MHz)であるプラズマを利用して真空容器(1)に配置される基板(11)の表面に薄膜を形成する高周波プラズマCVD法において、非接地電極(2)の一方の端部に配置された第1の給電点(20a)と、該第1の給電点と電力波の伝播上での対向点となる関係にある他方の端部に配置された第2の給電点(20b)との間隔を、使用電力の波長短縮率を考慮した波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定する第1のステップと、腹の位置が該第1及び第2の給電点のいずれか一方にあって節の位置が他方にある第1の定在波の発生条件を把握する第2のステップと、該第1の定在波の場合と位置関係が逆になる位置に腹と節がある第2の定在波の発生条件を把握する第3のステップと、該第2及び第3のステップでそれぞれに把握された該第1及び第2の定在波を互いに異なる時間帯で交互に発生させることにより、上記基板に目的とする薄膜を形成する第4のステップから成ることを特徴とする。

20

【0041】

本願に係わる第12の発明の高周波プラズマCVD法は、電源の周波数がVHF領域(30~300MHz)であるプラズマを利用して真空容器(1)に配置される基板(11)の表面に薄膜を形成する高周波プラズマCVD法において、非接地電極(2)の一方の端部に配置された第1の給電点(20a)と、該第1の給電点と電力波の伝播上での対向点となる関係にある他方の端部に配置された第2の給電点(20b)との間隔を、使用電力の波長短縮率を考慮した波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定する第1のステップと、該第1及び第2の給電点を結ぶ線分の中間地点に腹がある第1の定在波の発生条件を把握する第2のステップと、該中間地点に節がある第2の定在波の発生条件を把握する第3のステップと、該第2及び第3のステップでそれぞれに把握された該第1及び第2の定在波を互いに異なる時間帯で交互に発生させることにより、上記基板に目的とする薄膜を形成する第4のステップから成ることを特徴とする。

30

40

【発明の効果】

【0042】

本発明によれば、電極の両端に位置する第1及び第2の給電点の間隔が使用電力の波長短縮率を考慮した波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定されることにより、供給電力が電極端部で効果的に反射するので、該供給電力が一对の電極間で効率よく消費される。その結果、電力損失の抑制が可能である。また、互いに独立の関係にある第1及び第2の定在波を発生し、それぞれの腹の位置の間隔が使用電力の波長短縮率を考慮した波長の四分の一に設定されることから、均一性の良いプラズマが形成される。また、平衡非平衡変換装置と平衡伝送線路を有することから、一对の電極間を主体にプラズマを

50

形成することが可能である。その結果、パーティクル及びパウダー等の発生要因である一対の電極間以外に発生するプラズマを抑制することが可能である。したがって、従来技術に比べて、無効な電力の消費を大幅に抑制することが可能である。

更に、異常放電あるいはアーキングが抑制できることから、シリコン系半導体膜を高速で、大面積に、均一性良く、且つ、再現性良く製膜することが可能である。

これにより、集積化タンデム型薄膜太陽電池モジュールの製造及び微結晶シリコン膜及び結晶質シリコン膜を応用した各種デバイスの製造等の分野における生産ラインにおいて、電力使用の最小限化を図ると共に、生産性及び歩留まりが向上し、且つ、製品性能が向上するので、製造コストの低減効果は著しく大きいものがある。

【0043】

また、従来技術では困難である前記(い)～(ほ)の事項の全てを実現可能なプラズマCVD装置及び方法を提供することができる。

更に、本発明によれば、前記(い)～(ほ)の事項を全て実現できることから、従来技術に比べて、生産性向上及び製造コストの低減に対する寄与度が著しく大きい。

【発明を実施するための最良の形態】

【0044】

(実施例1)

以下、本発明を実施するための最良の形態について、図面を参照しながら詳細に説明する。なお、各図において、同様の部材には同一の符号を付し、重複する説明は省略する。

なお、以下の説明では、プラズマCVD装置及びプラズマCVD法の一例として、太陽電池用のi型微結晶半導体層を製作する装置及び方法が記載されているが、本願の発明対象が下記の例に限定されるものではない。

【0045】

まず、本発明の第1の実施形態に係わるプラズマCVD装置及びプラズマCVD法を図1ないし図8を参照して説明する。

【0046】

図1は本発明の第1の実施形態に係わるプラズマCVD装置の全体を示す概略図、図2は図1図示のプラズマCVD装置内部の一対の電極への電力供給部の構造を示す説明図、図3は図1図示のプラズマCVD装置内部の一対の電極へ給電された電力の伝播の概念図、図4は図1図示のプラズマCVD装置を用いたi型微結晶シリコン膜の製膜で行う電力供給の際の電力伝送の調整方法の例を示す説明図、図5は図1図示の第1及び第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器から出力されるパルス変調された出力の典型例を示す説明図、図6は図1図示の第1及び第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器から出力されるパルス変調された正弦波信号の典型例を示す説明図、図7は図1図示のプラズマCVD装置における一対の電極間に発生する2つの定在波の強さを示す説明図、図8は図1図示のプラズマCVD装置を用いた製膜条件の調整の際に得られるi型微結晶シリコン膜の膜厚分布の第1の典型例の説明図、図9は図1図示のプラズマCVD装置を用いた製膜条件の調整の際に得られるi型微結晶シリコン膜の膜厚分布の第2の典型例の説明図である。

【0047】

まず、装置の構成を説明する。図1、図2及び図3において、符番1は真空容器である。この真空容器1には、後述の原料ガスをプラズマ化する一対の電極、即ち非接地の第1の電極2と図示しない基板ヒータ3を内臓した接地された第2の電極4が配置されている。

符番2は該第1の電極で、絶縁物支持材5及びガス混合箱6を介して真空容器1に固着されている。第1の電極2は、図2及び図3に示すように、それぞれ矩形の平板であり、互いに対向して設置される。その具体的なサイズは、例えば、外寸法で、長さ1.6m×幅0.3m×厚み20mmとする。

なお、後述するように、電極へ供給される電力の伝播方向のサイズ、ここでは長さ1.6mという数値は、供給される電力の波長との関係により重要な意味がある。

また、第1の電極2は、図1に示すように、原料ガスが噴出するガスシャワー孔17を

10

20

30

40

50

有している。この孔 17 は直径約 0.4 ~ 0.8 mm で、例えば直径約 0.5 mm で、多数個が設定される。

符番 4 は第 2 の電極で、図示しない基板ヒータ 3 を内蔵し、その上に設置される基板 11 の温度を 100 ~ 300 の範囲で、任意の温度に設定可能である。なお、第 2 の電極 4 は基板ヒータ 3 の他に、冷媒を通すパイプを内蔵して、基板ヒータ 4 の表面の温度を制御することが可能である。

第 2 の電極 4 は、図 2 及び図 3 に示すように、それぞれ矩形の平板であり、第 1 の電極 2 に対向して設置される。その具体的なサイズは、例えば、外寸法で、長さ 1.6 m × 幅 0.4 m × 厚み 150 mm とする。

【0048】

第 1 の電極 2 には、その端部で、電力の伝搬上で互いに対向する関係にある地点に、それぞれ、第 1 及び第 2 の給電点 20a、20b が配置される。第 1 及び第 2 の給電点 20a、20b は、後述の電力供給系と電極 2 との接続点であり、その位置から電力が供給される。また、第 1 及び第 2 の給電点 20a、20b は、互いに対向した位置関係にあり、且つ、該電極の端部に設定され、高周波電力波の伝播上での対向点となる関係を有する。

第 2 の電極 4 には、その端部で、電力の伝搬上で互いに対向する関係にある地点に、それぞれ、第 3 及び第 4 の給電点 21a、21b が配置される。第 3 及び第 4 の給電点 21a、21b は、後述の電力供給系と電極 4 との接続点であり、その位置から電力が供給される。また、第 3 及び第 4 の給電点 21a、21b は、互いに対向した位置関係にあり、且つ、該電極の端部に設定され、高周波電力波の伝播上での対向点となる関係を有する。

【0049】

第 1 及び第 2 の電極 2、4 の間隔は、後述の基板リフター 12 を上下に作動させる際に、予め、任意に設定可能であり、5 mm ~ 40 mm の範囲で、例えば 8 mm に設定する。

【0050】

上記第 1 及び第 2 の給電点 20a、20b の間隔は、波長短縮率を考慮した使用電力の波長の四分の一の奇数 N 倍、即ち、 $N/4$ に設定する。また、同様に、上記第 3 及び第 4 の給電点 21a、21b の間隔は、波長短縮率を考慮した使用電力の波長の四分の一の奇数 N 倍、即ち、 $N/4$ に設定する。

ここでは、後述するシランガスのプラズマの生成において、VHF 帯域の周波数として、例えば、周波数 84 MHz の電力を用いることを考慮して、1.6 m とする。なお、波長短縮率 λ/λ_0 を 0.6 (即ち、 $\lambda = 0.6 \times 3.57 \text{ m}$) と見込み、 $N/4 = 3 \times 2.42 \text{ m} / 4 = 1.6 \text{ m}$ としている。

ただし、 λ は使用電力のプラズマ生成時の波長、 λ_0 は周波数 84 MHz の電磁波の真空中での波長である。

【0051】

波長短縮率を考慮した使用電力の波長 λ とは、プラズマが生成された一対の電極 2、4 間を電力が伝播する際の波長 λ のことである。例えば、シランガスのプラズマの生成に周波数 60 MHz の電力を用いる場合、圧力が約 40 ~ 530 Pa (0.3 ~ 4 Torr) であれば、 $\lambda =$ 約 3 m (真空中での波長 $\lambda_0 = 5 \text{ m}$) である。また、周波数 84 MHz の電力を用いる場合、圧力が約 40 ~ 530 Pa (0.3 ~ 4 Torr) であれば、 $\lambda =$ 約 1.6 m (真空中での波長 $\lambda_0 = 3.57 \text{ m}$) である。

波長短縮率を考慮した使用電力の波長 λ は、使用電力が真空中を伝播する際の波長 λ_0 より短い。波長 λ と波長 λ_0 との比、即ち、 λ/λ_0 は、シランガスのプラズマの場合、圧力が 530 ~ 1333 Pa (4 ~ 10 Torr) の場合、プラズマ密度が約 $6 \sim 10 \times 10^9 / \text{cm}^3$ であり、 $\lambda/\lambda_0 =$ 約 0.55 ~ 0.6 である。

なお、上記波長短縮率を考慮した使用電力の波長 λ が不明の場合は、後述するように、予め、波長短縮率を考慮した使用電力の波長の値を測定し、そのデータを用いて電極の設計及び製作を行う。

【0052】

符番 22a、22b は第 1 及び第 2 の絶縁材キャップで、それぞれ、後述の第 3 の同軸

10

20

30

40

50

ケーブル34aと第1の給電点20aの接続部、及び後述の第4の同軸ケーブル34bと第2の給電点20bの接続部での異常放電(アーキング)を抑制する機能を有する。なお、その材料には、例えば高純度アルミナを用いる。

【0053】

ガス混合箱6は原料ガス供給管8より供給されるシランガス(SiH₄)及び水素等のガスを、整流孔7を介して、前記一对の電極2と4の間に均一に供給する機能を有している。なお、原料ガス供給管8は図示しない絶縁材で、電氣的に絶縁されている。

供給されたSiH₄等原料ガスは、前記一对の電極2と4の間でプラズマ化された後、排気管9a、9b及び図示しない真空ポンプ10により、真空容器1の外部へ排出される。

10

【0054】

符番12は基板リフターで、図示しない基板搬入出ゲート13から第2の電極4上に基板11を受け取り、非接地電極2との間隔を所定の値に保つ位置まで、例えば、第1及び第2の電極2、4の間隔が8mmになる位置まで移動する。

なお、基板リフター12の上下位置は任意に設定可能であり、第1及び第2の電極2、4間を、例えば、5mm~40mmの範囲に設定する。

基板リフター12の上下動の際、真空容器1の気密を保持するためにベローズ14が用いられる。

また、後述するように、接地電極4と真空容器1の内壁との通電を良くするために、真空容器1内壁に固着されている第1の接続導体15aと第2の接続導体15b、第2の電極4に固着されている第3の接続導体16aと第4の接続導体16bが設置されている。なお、上記第1及び第2の電極2、4の間隔に対応して、第1の接続導体15a及び第2の接続導体15bの取り付け位置は、任意に設定できる。

20

また、第1の接続導体15aと第3の接続導体16a、及び第2の接続導体15bと第4の接続導体16bは、それぞれが接触した際に、互いに押し付けあうように、バネの特性を有している。なお、第1の接続導体15aと第3の接続導体16a、及び第2の接続導体15bと第4の接続導体16bは、再現性良く、導通状態を確保できるように設定される。

符番11は基板で、基板リフター12及び図示しない基板搬入出ゲート13を用いて、第2の電極4上に配置される。そして、図示しない基板ヒータ3により所定の温度に加熱される。ここでは、基板11は、サイズ1.5m×0.25m×厚み4mmのガラスを用いる。

30

【0055】

真空容器1内の圧力は、図示しない圧力計によりモニターされ、図示しない圧力調整弁により自動的に所定の値に調整、設定される。なお、本第1の実施形態の場合は、原料ガスが流量500sccm~1500sccm程度の場合、圧力0.01Torr~10Torr(1.33Pa~1330Pa)程度に調整できる。真空容器1の真空到達圧力は2~3E-7Torr(2.66~3.99E-5Pa)程度である。

【0056】

符番25aは第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器で、周波数30MHz~300MHz(VHF帯域)の任意の周波数、例えば84MHzの正弦波信号を発生し、かつ、該正弦波信号をパルス変調し、かつ、その2つの出力端子から出力される2つのパルス変調された正弦波信号の位相差を任意に設定することが可能である。

40

該2つのパルス変調された正弦波信号は、それぞれ、次のように表される。即ち、第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力端子26a、26bから出力される信号 W_{11} 、 W_{12} は、角周波数を ω 、時間を t 、初期位相を ϕ_1 、 ϕ_2 とおくと、

$$W_{11}(t) = \sin(\omega t + \phi_1)$$

$$W_{12}(t) = \sin(\omega t + \phi_2)$$

該位相可変2出力の発信器25aの2つの出力端子から出力される2つの正弦波信号の

50

位相差及びパルス変調のパルス幅 H_w 及び周期 T_0 は、該発信器 25 a に付属の位相差調整器及びパルス変調の調整器で、それぞれ任意の値に設定できる。

また、該第 1 のパルス変調方式位相可変 2 出力の発信器 25 a は、同期信号伝送ケーブル 24 を介して、後述の第 2 のパルス変調方式位相可変 2 出力の発信器 25 b へパルス変調の同期信号を送信する。

該第 1 のパルス変調方式位相可変 2 出力の発信器 25 a の 2 つの出力端子の一方の出力は、後述の第 1 の結合器 28 a に、他方の出力は後述の第 2 の結合器 28 b に伝送される。

符番 28 a は第 1 の結合器で、第 1 のパルス変調方式位相可変 2 出力の発信器 25 a の 2 つの出力端子の一方の出力信号と、後述の第 2 のパルス変調方式位相可変 2 出力の発信器 25 b の 2 つの出力端子の一方の出力信号を結合して、後述の第 1 の増幅器 29 a に伝送する。

【0057】

符番 29 a は第 1 の増幅器で、第 1 の結合器 28 a から送信された信号の電力を増幅する。符番 30 a は同軸ケーブルで、第 1 の増幅器 29 a の出力を後述の第 1 の整合器 31 a に伝送する。

符番 31 a は第 1 の整合器で、第 1 の増幅器 29 a の出力が後述の一对の電極 2、4 間に生成されるプラズマに効率よく伝送されるように、第 1 の増幅器 29 a の出力インピーダンスと、その負荷である一对の電極 2、4 間に生成されるプラズマのインピーダンスの整合調整をする。

符番 32 a は第 1 の同軸ケーブルで、後述の第 1 の電流導入端子 33 a、第 3 の同軸ケーブル 34 a 及び第 1 の芯線 35 a を介して、第 1 の接続導体 15 a と第 3 の接続導体 16 a とともに、第 1 の増幅器の出力を第 1 及び第 3 の給電点 20 a、21 a に供給する。

符番 33 a は真空容器 1 の壁に取り付けられた第 1 の電流導入端子で、真空容器の気密を保持して、第 1 の同軸ケーブル 32 a と第 3 の同軸ケーブル 34 a を接続する。

符番 34 a は第 3 の同軸ケーブルで、その芯線 35 a は第 1 の給電点 20 a にて電極 2 と接続され、その外部導体は真空容器 1 の内壁と第 1 の接続導体 15 a と第 3 の接続導体 16 a を介して、第 3 の給電点 21 a にて、第 2 の電極 4 と接続される。

なお、第 3 の同軸ケーブル 34 a の端部には、第 1 の絶縁材キャップ 22 a が取り付けられ、第 3 の同軸ケーブル 34 a と第 1 の給電点 20 a の接続部での異常放電（アーキング）を抑制する。

その結果、第 1 及び第 3 の同軸ケーブル 32 a、34 a を介して伝送された第 1 の増幅器 29 a の出力が、第 1 および第 3 の給電点 20 a、21 a を介して第 1 及び第 2 の電極間 2、4 に供給される。

【0058】

ここで、上記第 1 の増幅器 29 a の機能について、補足説明をする。

第 1 の増幅器 29 a には、図示しない出力値（進行波）のモニター及び下流側から反射して戻ってくる反射波のモニターが付属している。また、該反射波による該第 1 の電力増幅器 29 a 本体の電気回路を防護するためのアイソレータが付属されている。

出力値（進行波）のモニター及び下流側から反射して戻ってくる反射波のモニターは、例えば、図 4 に示す装置が用いられる。図 4 において、第 1 の増幅器 29 a の出力（進行波） P_f は方向性結合器 100 を介して、進行波検出器 101 により検出される。下流側から反射して戻ってくる反射波 P_r は、方向性結合器 100 を介して、反射波検出器 102 により検出される。

第 1 の増幅器 29 a の出力の調整は、図 4 において、先ず、例えば第 1 の増幅器 29 a の最大出力の 20~30% 程度の出力を、第 1 の整合器 31 a と第 1 の同軸ケーブル 32 a を介して、真空容器 1 に内臓の第 1 及び第 2 の電極 24 に供給する。

次に、第 1 の増幅器 29 a に付属した進行波 P_f 及び反射波 P_r の検出器を見ながら、第 1 の整合器 31 a のリアクタンス（ L と C ）を調整する。第 1 の整合器 31 a のリアクタンス（ L と C ）を調整しながら、反射波 P_r が最小値になる条件を選定する。そして、

10

20

30

40

50

第1の増幅器29aの出力を所要の数値に設定して、その出力で、再度、第1の整合器31aのリアクタンス(LとC)を調整しながら、反射波Prが最小値になる条件を選ぶ。

なお、この整合器の調整、即ち、反射波Prが最小値になる条件は、プラズマ生成条件を変更しない限り変化はないので、特に多くの時間を必要とはしない。

【0059】

符番25bは第2のパルス変調方式位相可変2出力の発信器で、周波数30MHz~300MHz(VHF帯域)の任意の周波数、例えば84MHzの正弦波信号を発生し、かつ、該正弦波信号をパルス変調し、かつ、その2つの出力端子から出力される2つのパルス変調された正弦波信号の位相差を任意に設定することが可能である。

該2つのパルス変調された正弦波信号は、それぞれ、次のように表される。即ち、第2の10
パルス変調方式位相可変2出力の発信器25bの2つの出力端子27a、27bから出力される信号 W_{21} 、 W_{22} は、角周波数を ω 、時間を t 、初期位相を ϕ_1 、 ϕ_2 とおくと、

$$W_{21}(t) = \sin(\omega t + \phi_1)$$

$$W_{22}(t) = \sin(\omega t + \phi_2)$$

該位相可変2出力の発信器25bの2つの出力端子から出力される2つの正弦波信号の位相差及びパルス変調のパルス幅Hw及び周期T0は、該発信器25bに付属の位相差調整器及びパルス変調の調整器で、それぞれ任意の値に設定できる。

また、該第2のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25bは、第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aから発信されるパルス変調の同期信号を、同期信号伝送20
ケーブル24を介して受信し、その信号に同期した信号を発生できる。

該第2のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25bの2つの出力端子の一方の出力は、第1の結合器28aに、他方の出力は後述の第2の結合器28bに伝送される。

符番28bは第2の結合器で、第2のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25bの2つの出力端子の一方の出力信号と、第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力端子の一方の出力信号を結合して、後述の第2の増幅器29bに伝送する。

【0060】

符番29bは第2の増幅器で、第2の結合器28bから送信された信号の電力を増幅する。符番30bは同軸ケーブルで、第2の増幅器29bの出力を後述の第2の整合器3130
bに伝送する。

符番31bは第2の整合器で、第2の増幅器29bの出力が一对の電極2、4間に生成されるプラズマに効率よく伝送されるように、第2の増幅器29bの出力インピーダンスと、その負荷である一对の電極2、4間に生成されるプラズマのインピーダンスの整合調整をする。

符番32bは第2の同軸ケーブルで、第2の電流導入端子33b、第4の同軸ケーブル34b及びその芯線35bを介して、第2の接続導体15bと第4の接続導体16bとともに、第2の増幅器の出力を第2及び第4の給電点20b、21bに供給する。

符番33bは真空容器1の壁に取り付けられた第2の電流導入端子で、真空容器の気密を保持して、第2の同軸ケーブルと第4の同軸ケーブルを接続する。40

符番34bは第4の同軸ケーブルで、その芯線35bは第2の給電点20bにて電極2と接続され、その外部導体は真空容器1の内壁と第2の接続導体15bと第4の接続導体16bを介して、第4の給電点21bにて、第2の電極4と接続される。

なお、第4の同軸ケーブル34bの端部には、第2の絶縁材キャップ22bが取り付けられ、第4の同軸ケーブル34bと第2の給電点20bの接続部での異常放電(アーキング)を抑制する。

その結果、第2及び第4の同軸ケーブル32b、34bを介して伝送された第2の増幅器29bの出力が、第2および第4の給電点20b、21bを介して第1及び第2の電極間2、4に供給される。

【0061】

10

20

30

40

50

ここで、上記第2の増幅器29bの機能について、補足説明をする。

第2の増幅器29bには、第1の増幅器29aと同様に、図示しない出力値（進行波）のモニター及び下流側から反射して戻ってくる反射波のモニターが付属している。また、該反射波による第2の電力増幅器29b本体の電気回路を防護するためのアイソレータが付属されている。

また、出力値（進行波）のモニター及び下流側から反射して戻ってくる反射波のモニターは、第1の増幅器29aの場合と同様である。

また、第2の増幅器29bの出力の調整の方法は、第1の増幅器29aの場合と同様である。

【0062】

ここで、説明の便宜上、上記第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力の一方、即ち出力端子26aの出力信号が、第1の結合器28a、第1の増幅器29a、同軸ケーブル30a、第1の整合器31a、第1の同軸ケーブル32a、第1の電流導入端子33a、第3の同軸ケーブル34aを介して、第1の給電点20aと第3の給電点21aに伝送される電力を、第1の電力と呼ぶ。

また、同様に、第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力の一方、即ち出力端子26bの出力信号が、第2の結合器28b、第2の増幅器29b、同軸ケーブル30b、第2の整合器31b、第2の同軸ケーブル32b、第2の電流導入端子33b、第4の同軸ケーブル34bを介して、第2の給電点20bと第4の給電点21bに伝送される電力を、第2の電力と呼ぶ。

また、第2のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25bの2つの出力の一方、即ち出力端子27aの出力信号が、第1の結合器28a、第1の増幅器29a、同軸ケーブル30a、第1の整合器31a、第1の同軸ケーブル32a、第1の電流導入端子33a、第3の同軸ケーブル34aを介して、第1の給電点20aと第3の給電点21aに伝送される電力を、第3の電力と呼ぶ。

また、第2のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25bの2つの出力の一方、即ち出力端子27bの出力信号が、第2の結合器28b、第2の増幅器29b、同軸ケーブル30b、第2の整合器31b、第2の同軸ケーブル32b、第2の電流導入端子33b、第4の同軸ケーブル34bを介して、第2の給電点20bと第4の給電点21bに伝送される電力を、第4の電力と呼ぶ。

【0063】

また、ここで、上記第1、第2、第3及び第4の電力の時間的な関係を明らかにする為に、その概念を図5及び図6を参照して説明する。図5は横軸が時間 t で、縦軸が電力を示す。図6は横軸が時間 t で、縦軸が電圧を示す。

第1及び第3の給電点20a、21a間に供給されるパルス変調された第1の電力と、第2及び第4の給電点20b、21b間に供給されるパルス変調された第2の電力の典型例を、図5及び図6に、それぞれ $W_{11}(t)$ 、 $W_{12}(t)$ で示している。この2つの電力は、パルス幅 H_w 、周期 T_0 でパルス変調された正弦波である。

第1及び第3の給電点20a、21a間に供給されるパルス変調された第3の電力と、第2及び第4の給電点20b、21b間に供給されるパルス変調された第4の電力の典型例を、図5及び図6に、それぞれ $W_{21}(t)$ 、 $W_{22}(t)$ で示している。この2つの電力波は、パルス幅 H_w 、周期 T_0 で、かつ、前記 $W_{11}(t)$ 及び $W_{12}(t)$ のパルス変調のパルス立ち上がり時間より半周期、即ち $T_0/2$ 遅れた時刻に立ち上がるパルス変調された正弦波である。

【0064】

また、ここで、図1、図2及び図3に示されている第1の給電点20aと第2の給電点20bの間の距離、及び第3の給電点21aと第4の給電点21bの間の距離が、それぞれ、波長短縮率を考慮した使用電力の波長の四分の一の奇数 N 倍、即ち、 $N/4$ に設定されることによる作用について、説明する。

上記第1の電力が、第1及び第3の給電点20a、21aを介して一对の電極2、4に

10

20

30

40

50

供給されると、その電力波は、進行波として、第1の給電点20a側から第2の給電点20b側へ伝播する。そして、その電力波が第2及び第4の給電点20b、21bが設置されている一対の電極の端部に到達すると、該端部はインピーダンスの不連続部分であることから、その端部で反射が起こる。その反射波は、第2の給電点20bから第1の給電点20aを向いた方向へ伝播する。

もしも、上記第1の電力の進行波が該第2及び第4の給電点20b、21bが設置されている一対の電極の端部で反射しないとすれば、該進行波は第2の同軸ケーブル32bを伝播して第2の整合器31bに到達する。そして、該第2の整合器31bで反射して戻ってくる。この場合、第2の給電点20bと第2の整合器31b間で電力が消費されるという問題、即ち、一対の電極2、4間でのプラズマ生成以外での電力消費という問題が残る。

10

上記第1の給電点20a側から供給された電力の進行波と第2の給電点20b側の一対の電極の端部で反射した反射波が重なり合うと干渉現象により、定在波を発生する。この場合、上記進行波の供給地点と反射波の発生地点の間の距離が、波長短縮率を考慮した使用電力の波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定されているので、発生する定在波の腹が上記進行波の供給地点に、該定在波の節が反射波の発生地点に発生し易いという現象が現れる。同様に、発生する定在波の節が上記進行波の供給地点に、該定在波の腹が反射波の発生地点に発生し易いという現象が現れる。なお、この現象は、音響工学分野で起こる共鳴現象に似た現象である。

上記第1の電力の進行波とその反射波の共鳴現象に似た現象により、該一対の電極間以外での消費が減少するという作用が生まれる。即ち、該一対の電極への電力供給線路における電力損失が最小限に抑制されるという作用がある。

20

上記の場合、2つの給電点の間隔が波長の二分の一の整数n倍、即ち、 $n/2$ に設定される場合に比べて定在波の生成が容易であり、その電气的設定条件の調整が容易である。

同様に、上記第2の電力が、第2及び第4の給電点20b、21bを介して一対の電極2、4に供給されると、その電力波は、進行波として、第2の給電点20b側から第1の給電点20a側へ伝播する。そして、その電力波が第1及び第3の給電点20a、21aが設置されている一対の電極の端部に到達すると、該端部はインピーダンスの不連続部分であることから、該端部で反射が起こる。その反射波は、第1の給電点20aから第2の給電点20bを向いた方向へ伝播する。

30

もしも、上記第2の電力の進行波が該第1及び第3の給電点20a、21aが設置されている一対の電極の端部で反射しないとすれば、該進行波は第1の同軸ケーブル32aを伝播して第1の整合器31aに到達する。そして、該第1の整合器31aで反射して戻ってくる。この場合、第1の給電点20aと第1の整合器31a間で電力が消費されるという問題、即ち、一対の電極2、4間でのプラズマ生成以外での電力消費という問題が残る。

上記第2の給電点20b側から供給された電力の進行波と第1の給電点20a側の一対の電極の端部で反射した反射波が重なり合うと干渉現象により、定在波を発生する。この場合、上記進行波の供給地点と反射波の発生地点の間の距離が、波長短縮率を考慮した使用電力の波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定されているので、発生する定在波の腹が上記進行波の供給地点に、該定在波の節が反射波の発生地点に発生し易いという現象が現れる。同様に、発生する定在波の節が上記進行波の供給地点に、該定在波の腹が反射波の発生地点に発生し易いという現象が現れる。なお、この現象は、音響工学分野で起こる共鳴現象に似た現象である。

40

上記第2の電力の進行波とその反射波の共鳴現象に似た現象により、該一対の電極間以外での消費が減少するという作用が生まれる。即ち、該一対の電極への電力供給線路における電力損失が最小限に抑制されるという作用がある。

なお、第3及び第4の電力の供給においても、上記と同様に、第3及び第4の電力の進行波とその反射波の共鳴現象に似た現象により、それぞれ、該一対の電極への電力供給線

50

路における電力損失が最小限に抑制されるという作用がある。

なお、上記の場合、2つの給電点の間隔が波長の二分の一の整数 n 倍、即ち、 $n / 2$ に設定される場合に比べて定在波の生成が容易であり、その電氣的設定条件の調整が容易である。

【0065】

次に、上記構成を有するプラズマCVD装置を用いて、集積化タンデム型薄膜太陽電池用 i 型微結晶シリコン膜を製膜する方法を説明する。

i 型微結晶シリコン膜の製膜に際し、原料ガス、圧力、投入すべき電力の密度及び基板温度については、公知の知見、例えば特許文献1及び非特許文献1に記載の条件を採用する。

しかしながら、上記構成を有するプラズマCVD装置に係わる特有の諸条件は、以下に示す手順で、予め確認し、調整することが必要である。その後、目的とする i 型微結晶シリコン膜の製膜を行う。

【0066】

(ステップ1) 目的とする i 型微結晶シリコン膜の製膜条件中、原料ガス、圧力、投入すべき電力の密度及び基板温度は、公知の知見を採用し、その条件における一对の電極2、4間を伝播する電力の波長を測定する。その測定データを基に、第1及び第2の給電点20a、20bの間隔が電力の波長の四分の一の奇数 N 倍、即ち、 $N / 4$ に設定されていることを確認する。

(ステップ2) 前記第1及び第2の電力を一对の電極2、4に供給して発生させる第1の定在波の腹の位置の調整に必要なデータの把握、即ち、前記第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力の位相差の設定値と第1の定在波の腹の位置との関係を把握する。

(ステップ3) 前記第3及び第4の電力を一对の電極2、4に供給して発生させる第2の定在波の腹の位置の調整に必要なデータの把握、即ち、前記第2のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25bの2つの出力の位相差の設定値と第2の定在波の腹の位置との関係を把握する。

(ステップ4) 第1の定在波と第2の定在波を発生させ、目的とする i 型微結晶シリコン膜の製膜を行う。

なお、以下において、説明の便宜上、ステップ1～ステップ4で用いるプラズマCVD装置一式は、全て同一の装置を用いて行う前提で説明するが、ステップ1については、別の装置、例えば研究開発用の装置を用いて行うことができる。ただし、ステップ2～ステップ4は同一の装置を用いるのが好ましい。

【0067】

(ステップ1)

図1～図4において、予め、基板11を第2の電極4の上に設置し、図示しない真空ポンプ10を稼働させ、真空容器1内の不純物ガス等を除去した後、原料ガス供給管8からSiH₄ガスを、0.8～1.0 SLM(標準状態換算でのガス流量：L/分)、例えば0.8 SLM、水素を5.0 SLMで供給しつつ、圧力を5.0 Torr(665 Pa)に維持する。基板温度は100～350の範囲、例えば220に保持する。

なお、基板11のサイズは、第1の電極のサイズに合わせて、長さ1.6m×幅0.3m(厚み4mm)とする。

次に、前記第1の電力と第2の電力の周波数を、例えば、84MHz、パルス幅Hw=400μ秒、パルス周期T0=1m秒、電力は、合計で1～1.5KW、例えば、1KWを供給する。なお、パルス幅Hwが400μ秒、パルス周期T0が1m秒であるので、デューティ比は400μ秒/1m秒=0.4である。

即ち、第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力の位相差を、例えば零に、パルス幅Hw=400μ秒、パルス周期T0=1m秒に設定し、第1の電力増幅器29aの出力を500Wに設定して、その出力を第1の整合器31a、第1の同軸ケーブル32a、第1の電流導入端子33a、第3の同軸ケーブル34aを介して、第1

10

20

30

40

50

及び第3の給電点20a、21aに供給するとともに、第2の電力増幅器29bの出力を500Wに設定して、その出力を第2の整合器31b、第2の同軸ケーブル32b、第2の電流導入端子33b、第4の同軸ケーブル34bを介して、第2及び第4の給電点20b、21b間に供給する。

この場合、第1の整合器31a及び第2の整合器31bを調整することにより、それぞれの整合器31a、31bの上流側に上記供給電力の反射波が戻らないように、即ち、図4図示のPrが戻らないようにすることができる。一般的には、反射波Prは進行波Pfの1～3%程度に抑えることができる。

【0068】

上記の条件で、4～6分程度の時間、プラズマを生成すると、基板11にi型微結晶シリコン膜が堆積する。製膜後、真空容器1から前記基板11を取り出して、該i型微結晶シリコン膜の膜厚み分布を評価する。

基板11に堆積されたi型微結晶シリコン膜の膜厚分布は、後述するように、VHFプラズマ固有の現象である定在波の発生により、正弦的な分布となる。

このような、製膜試験を第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力の位相差をパラメータに、例えば、5～6回実施する。

そして、第1及び第2の給電点20a、20bを結ぶ方向において、定在波の腹の間隔を測定する。即ち、基板11に堆積されたi型微結晶シリコン膜の膜厚が最大である位置と、その隣にある膜厚が最大である位置間の距離を測定する。

なお、この間隔は、使用電力のプラズマ生成時の波長 λ_0 の二分の一の値であることを意味する。

【0069】

上記測定結果より、使用電力の波長短縮率及び上記第1及び第2の給電点の間の距離の設定値 $=1.6\text{ m}$ について評価する。

仮に、上記定在波の腹の間隔が、 1.07 m である場合、使用電力のプラズマ生成時の波長 $\lambda_0 = 1.07\text{ m} \times 2 = 2.14\text{ m}$ である。この場合、使用電力の波長短縮率 λ/λ_0 は、

$$\lambda/\lambda_0 = 2.14\text{ m} / 3.57\text{ m} = 0.6$$

であることが判る。ただし、 λ_0 は使用電力のプラズマ生成時の波長、 f_0 は周波数84MHzの電磁波の真空中での波長である。

上記第1及び第2の給電点の間の距離の設定値 $=1.6\text{ m}$ は、 $3 \times \lambda_0 / 4 = 3 \times 0.535\text{ m} = 1.605\text{ m}$ = 波長短縮率を考慮した波長 λ の四分の一の奇数倍の値に合致していることが確認される。

【0070】

上記測定結果において、上記定在波の腹の間隔が 1.07 m と異なる場合、例えば、上記定在波の腹の間隔が 1.18 m の場合、使用電力のプラズマ生成時の波長 $\lambda_0 = 1.18\text{ m} \times 2 = 2.36\text{ m}$ である。この場合、使用電力の波長短縮率 λ/λ_0 は、

$$\lambda/\lambda_0 = 2.36\text{ m} / 3.57\text{ m} = 0.66$$

であることが判る。ただし、 λ_0 は使用電力のプラズマ生成時の波長、 f_0 は周波数84MHzの電磁波の真空中での波長である。

この場合は、上記第1及び第2の給電点の間の距離の設定値 $=1.6\text{ m}$ が、波長短縮率を考慮した波長 λ の四分の一の奇数倍の値に合致しないので、その設定値 1.6 m を、例えば 1.767 m に変更することが必要である。

あるいは、使用電力の波長短縮率 λ/λ_0 が0.66であることが確認できたので、このデータを活用して、周波数84MHzを92MHzに変更することでも良い。

即ち、周波数92MHzの電磁波の真空中での波長は 3.26 m であること、及び使用電力の波長短縮率 λ/λ_0 が0.66であることを考慮すると、上記プラズマ生成時での周波数92MHzの波長 λ は、 $\lambda = 0.66 \times 3.26\text{ m} = 2.151\text{ m}$ である。この場合、 $3 \times \lambda_0 / 4 = 1.6\text{ m}$ となる。

【0071】

10

20

30

40

50

ステップ1においては、上述の通り、i型微結晶シリコン膜の製膜条件における使用電力の波長を測定し、そのデータを基に、第1及び第2の給電点20a、20b間の距離が、使用電力のプラズマ生成時の波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ であることを確認する。また、測定された使用電力の波長短縮率を確認する。

第1及び第2の給電点20a、20b間の距離が、使用電力のプラズマ生成時の波長の四分の一の奇数倍の値になっていない場合は、その条件を満たすように、上記第1及び第2の給電点20a、20b間の距離を再設定する。

または、上記条件を満たすように、プラズマ生成電力の周波数を変更する。

ここでは、説明の便宜上、ステップ1の結果として、第1及び第2の給電点の間の距離の設定値 = 1.6mが、 $3 \times / 4 = 3 \times 0.535 \text{ m} = \text{波長短縮率を考慮した波長の四分の一の奇数倍の値に合致していることが確認されたとして、以下説明を行う。即ち、周波数} 84 \text{ MHz}$ である。

【0072】

(ステップ2)

図1～図4において、予め、基板11を第2の電極4の上に設置し、図示しない真空ポンプ10を稼働させ、真空容器1内の不純物ガス等を除去した後、原料ガス供給管8からSiH₄ガスを、0.8～1.0 SLM(標準状態換算でのガス流量：L/分)、例えば0.8 SLM、水素を5.0 SLMで供給しつつ、圧力を5.0 Torr(665 Pa)に維持する。基板温度は100～350の範囲、例えば220に保持する。

基板11のサイズは、長さ1.5m×幅0.25m(厚み4mm)とする。なお、第1の電極のサイズより小さくするのは、電極の端部では、エッジ効果によりプラズマの強さに再現性がない場合があるという経験的な知見に基づくものである。

次に、前記第1の電力と第2の電力の周波数を84 MHz、パルス幅Hw = 400 μ秒、パルス周期T0 = 1m秒、電力は、合計で1～1.5 KW、例えば、1 KWを供給する。

即ち、第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力の位相差を、例えば零に、パルス幅Hw = 400 μ秒、パルス周期T0 = 1m秒に設定し、第1の電力増幅器29aの出力を500 Wに設定して、その出力を第1の整合器31a、第1の同軸ケーブル32a、第1の電流導入端子33a、第3の同軸ケーブル34aを介して、第1及び第3の給電点20a、21aに供給するとともに、第2の電力増幅器29bの出力を500 Wに設定して、その出力を第2の整合器31b、第2の同軸ケーブル32b、第2の電流導入端子33b、第4の同軸ケーブル34bを介して、第2及び第4の給電点20b、21b間に供給する。

この場合、第1の整合器31a及び第2の整合器31bを調整することにより、それぞれの整合器31a、31bの上流側に上記供給電力の反射波が戻らないように、即ち、図4図示のPrが戻らないようにすることができる。一般的には、反射波Prは進行波Pfの1～3%程度に抑えることができる。

【0073】

上記の条件で、4～6分程度の時間、プラズマを生成すると、基板11にi型微結晶シリコン膜が堆積する。基板11に堆積されたi型微結晶シリコン膜の膜厚分布は、以下に説明するように、VHFプラズマ固有の現象である定在波の発生により、正弦的な分布となる。

【0074】

上記第1及び第3の給電点20a、21aからパルス状に供給される第1の電力の電圧波と、上記第2及び第4の給電点20b、21bからパルス状に供給される第2の電力の電圧波は、同一電源から発振され、互いに電極間を伝播していくので、すなわち、両者は互いに向かい合った方向から伝播しあって重なり合うので、干渉現象が発生する。

図3において、第1の給電点20a側から第2の給電点20bの方向の距離をxとし、xの正方向へ伝播する電圧波をW11(x, t)、xの負方向へ伝播する電圧波、即ち第2の給電点21a側から第1の給電点20aの方向へ伝播する電圧波をW12(x, t)

とすると、次のように表現される。

$$W_{11}(x, t) = V_1 \cdot \sin(t + 2\pi x / \lambda)$$

$$W_{12}(x, t) = V_1 \cdot \sin\{t - 2\pi(x - L_0) / \lambda + \phi\}$$

ただし、 V_1 は電圧波の振幅、 ω は電圧の角周波数、 λ は電圧波の波長、 t は時間、 L_0 は第1及び第2の給電点の間隔、 ϕ は第1の電力の電圧波と第2の電力の電圧波の位相差である。この2つの電圧波の合成波 $W_1(x, t)$ は次式ようになる。

$$\begin{aligned} W_1(x, t) &= W_{11}(x, t) + W_{12}(x, t) \\ &= 2 \cdot V_1 \cos\{2\pi(x - L_0/2) / \lambda - \phi / 2\} \cdot \sin\{t + (\pi L_0 / \lambda + \phi / 2)\} \end{aligned}$$

上記合成波 $W_1(x, t)$ は、次に示すような性質を有する。即ち、 $\phi = 0$ の場合、生成されるプラズマの強さは給電点間の中央部($x = L_0 / 2$)が強く、該中央部から離れるにしたがって弱くなる。 $\phi > 0$ の場合、プラズマの強い部分が一方の給電点側へ移動し、 $\phi < 0$ の場合、他方の給電点側へ移動する。

なお、ここでは、 $W_{11}(x, t)$ と $W_{12}(x, t)$ の2つの電圧波の合成波を第1の定在波 $W_1(x, t)$ と呼ぶ。

【0075】

一对の電極間の電力の強さは、電圧の合成波 $W_1(x, t)$ の振幅値の二乗に比例する。即ち、電力の強さ $I_1(x, t)$ は、

$$I_1(x, t) \propto \cos^2\{2\pi(x - L_0/2) / \lambda - \phi / 2\}$$

と表される。この $I_1(x, t)$ を概念的に、図7に実線(第1の定在波の強さの分布)で示す。

【0076】

さて、上記の条件で製膜後、真空容器1から前記基板11を取り出して、該i型微結晶シリコン膜の膜厚み分布を評価する。

基板11に堆積されたi型微結晶シリコン膜の膜厚分布は、前記のように、VHFプラズマ固有の現象である定在波の発生により、正弦的な分布となる。

このような、製膜試験を第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力の位相差をパラメータに繰り返し実施する。

そして、第1及び第2の給電点20a、20bを結ぶ方向において、基板11の中央点から正弦的な膜厚分布の最大厚みの位置までの距離と、第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力の位相差の関係をデータとして把握する。

例えば、図8(a)の点線の位置が基板11の中央点である場合に、その中央点とそれより左側にある正弦的な膜厚分布の最大厚みの位置との距離が $\lambda / 8$ であるという条件を満たすための位相差は、例えば $\pi / 4$ であることが把握される。

ここで、図8(a)図示の正弦的な膜厚分布は、上記第1の定在波 $W_1(x, t)$ の強さの分布、即ち、

$$I_1(x, t) \propto \cos^2\{2\pi(x - L_0/2) / \lambda - \phi / 2\}$$

に比例した分布を示している。この状態は、基板の一方の端に第1の定在波の節があり、他方の端に腹があるということを示している。

即ち、第1及び第2の給電点20a、20b間の距離が、波長短縮率を考慮した使用電力の波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N \cdot \lambda / 4$ に設定されているので、ここでは、電極の左側の端に節が、右側の端に腹ができるという状態が得られる。

【0077】

上記正弦的な膜厚分布を製膜する際、第1及び第2の給電点20a、20b間の距離と、第1及び第2の給電点21a、21b間の距離が、それぞれ、波長短縮率を考慮した波長の四分の一の奇数倍の値に合致していること、及びその位置は一对の電極の端部であることから、一对の電極の両端の一方を節、他方を腹とする定在波が発生し易いという共鳴現象が現れる。

この共鳴現象には、上述した通り、安定したプラズマ生成が容易であることに加えて、供給電力がプラズマ生成に効果的に消費されるという作用を有することを意味している。

【 0 0 7 8 】

ところで、上記ステップ 2 において、正弦的な膜厚分布と供給電力の位相差 1 の関係を把握する際に得られる正弦的な膜厚分布は、図 8 (a) に示された分布で合った。しかしながら、図 8 (a) に示された正弦的な膜厚分布以外にも、例えば、図 9 (a) に示される正弦的な膜厚分布も安定して生成できるパターンである。

図 9 (a) は、同図の点線の位置が基板 1 1 の中央点である場合に、該中央点に第 1 の定在波の腹がある状態である。したがって、上記ステップ 2 では、正弦的な膜厚分布の最大厚み位置と電力供給系の位相差 1 の関係を把握する際に、第 1 の定在波のモードとして、図 8 (a) 及び図 9 (a) に示される第 1 の定在波のモードを選ぶことができる。

【 0 0 7 9 】

(ステップ 3)

図 1 ~ 図 4 において、予め、基板 1 1 を第 2 の電極 4 の上に設置し、図示しない真空ポンプ 1 0 を稼働させ、真空容器 1 内の不純物ガス等を除去した後、原料ガス供給管 8 から Si H 4 ガスを、0 . 8 ~ 1 . 0 S L M (標準状態換算でのガス流量：L / 分)、例えば 0 . 8 S L M、水素を 5 . 0 S L M で供給しつつ、圧力を 5 . 0 T o r r (6 6 5 P a) に維持する。基板温度は 1 0 0 ~ 3 5 0 の範囲、例えば 2 2 0 に保持する。

基板 1 1 のサイズは、長さ 1 . 5 m x 幅 0 . 2 5 m (厚み 4 m m) とする。なお、第 1 の電極のサイズより小さくするのは、電極の端部では、エッジ効果によりプラズマの強さに再現性がない場合があるという経験的な知見に基づくものである。

次に、前記第 3 の電力と第 4 の電力の周波数を 8 4 M H z、パルス幅 H w = 4 0 0 μ 秒、パルス周期 T 0 = 1 m 秒、電力は、合計で 1 ~ 1 . 5 K W、例えば、1 K W を供給する。

即ち、第 2 のパルス変調方式位相可変 2 出力の発信器 2 5 b の 2 つの出力の位相差を、例えば零に、パルス幅 H w = 4 0 0 μ 秒、パルス周期 T 0 = 1 m 秒に設定し、第 1 の電力増幅器 2 9 a の出力を 5 0 0 W に設定して、その出力を第 1 の整合器 3 1 a、第 1 の同軸ケーブル 3 2 a、第 1 の電流導入端子 3 3 a、第 3 の同軸ケーブル 3 4 a を介して、第 1 及び第 3 の給電点 2 0 a、2 1 a に供給するとともに、第 2 の電力増幅器 2 9 b の出力を 5 0 0 W に設定して、その出力を第 2 の整合器 3 1 b、第 2 の同軸ケーブル 3 2 b、第 2 の電流導入端子 3 3 b、第 4 の同軸ケーブル 3 4 b を介して、第 2 及び第 4 の給電点 2 0 b、2 1 b 間に供給する。

この場合、第 1 の整合器 3 1 a 及び第 2 の整合器 3 1 b を調整することにより、それぞれの整合器 3 1 a、3 1 b の上流側に上記供給電力の反射波が戻らないように、即ち、図 4 図示の P r が戻らないようにすることができる。一般的には、反射波 P r は進行波 P f の 1 ~ 3 % 程度に抑えることができる。

【 0 0 8 0 】

上記の条件で、4 ~ 6 分程度の時間、プラズマを生成すると、基板 1 1 に i 型微結晶シリコン膜が堆積する。基板 1 1 に堆積された i 型微結晶シリコン膜の膜厚分布は、以下に説明するように、V H F プラズマ固有の現象である定在波の発生により、正弦的な分布となる。

【 0 0 8 1 】

上記第 1 及び第 3 の給電点 2 0 a、2 1 a からパルス状に供給される第 3 の電力の電圧波と、上記第 2 及び第 4 の給電点 2 0 b、2 1 b からパルス状に供給される第 4 の電力の電圧波は、同一電源から発振され、互いに電極間を伝播していくので、すなわち、両者は互いに向かい合った方向から伝播しあって重なり合うので、干渉現象が発生する。

図 3 において、第 1 の給電点 2 0 a 側から第 2 の給電点 2 0 b の方向の距離を x とし、x の正方向へ伝播する電圧波を W 2 1 (x、t)、x の負方向へ伝播する電圧波、即ち第 2 の給電点 2 0 b 側から第 1 の給電点 2 0 a の方向へ伝播する電圧波を W 2 2 (x、t) とすると、次のように表現される。

$$W 2 1 (x、t) = V 1 \cdot \sin (t + 2 \pi x / \lambda)$$

$$W 2 2 (x、t) = V 1 \cdot \sin \{ t - 2 \pi (x - L 0) / \lambda + \phi \}$$

10

20

30

40

50

ただし、 V_1 は電圧波の振幅、 ω は電圧の角周波数、 λ は電圧波の波長、 t は時間、 L_0 は第 1 及び第 2 の給電点の間隔、 ϕ は第 3 の電力の電圧波と第 4 の電力の電圧波の位相差である。この 2 つの電圧波の合成波 $W_2(x, t)$ は次式のようになる。

$$W_2(x, t) = W_{21}(x, t) + W_{22}(x, t) \\ = 2 \cdot V_1 \cos \left\{ 2\pi \left(x - L_0 / 2 \right) / \lambda - \omega t / 2 \right\} \cdot \sin \left\{ \omega t + \left(L_0 / \lambda + \phi / 2 \right) \right\}$$

上記合成波 $W_2(x, t)$ は、次に示すような性質を有する。即ち、 $\phi = 0$ の場合、生成されるプラズマの強さは給電点間の中央部 ($x = L_0 / 2$) が強く、該中央部から離れるにしたがって弱くなる。 $\phi > 0$ の場合、プラズマの強い部分が一方の給電点側へ移動し、 $\phi < 0$ の場合、他方の給電点側へ移動する。

10

なお、ここでは、 $W_{21}(x, t)$ と $W_{22}(x, t)$ の 2 つの電圧波の合成波を第 2 の定在波 $W_2(x, t)$ と呼ぶ。

【 0 0 8 2 】

一対の電極間の電力の強さは、電圧の合成波 $W_2(x, t)$ の振幅値の二乗に比例する。即ち、電力の強さ $I_2(x, t)$ は、

$$I_2(x, t) \propto \cos^2 \left\{ 2\pi \left(x - L_0 / 2 \right) / \lambda - \omega t / 2 \right\}$$

と表される。この $I_2(x, t)$ を概念的に、図 7 に点線 (第 2 の定在波の強さの分布) で示す。

【 0 0 8 3 】

さて、上記の条件で製膜後、真空容器 1 から前記基板 1 1 を取り出して、該 i 型微結晶シリコン膜の膜厚み分布を評価する。

20

基板 1 1 に堆積された i 型微結晶シリコン膜の膜厚分布は、前記のように、VHF プラズマ固有の現象である定在波の発生により、正弦的な分布となる。

このような、製膜試験を第 2 のパルス変調方式位相可変 2 出力の発信器 2 5 b の 2 つの出力の位相差をパラメータに繰り返し実施する。

そして、第 1 及び第 2 の給電点 2 0 a、2 0 b を結ぶ方向において、基板 1 1 の中央点から正弦的な膜厚分布の最大厚みの位置までの距離と、第 1 のパルス変調方式位相可変 2 出力の発信器 2 5 b の 2 つの出力の位相差の関係をデータとして把握する。

例えば、図 8 (b) の点線の位置が基板 1 1 の中央点である場合に、該中央点とその右側にある正弦的な膜厚分布の最大厚みの位置までの距離を、波長 λ の八分の一、即ち $\lambda / 8$ に設定するための位相差は、例えば $\pi / 2$ であることが把握される。なお、ステップ 1 での測定の結果から、 $\lambda / 8 = 26.9 \text{ mm}$ である。

30

ここで、図 8 (b) 図示の正弦的な膜厚分布は、上記第 2 の定在波 $W_2(x, t)$ の強さの分布、即ち、

$$I_2(x, t) \propto \cos^2 \left\{ 2\pi \left(x - L_0 / 2 \right) / \lambda - \omega t / 2 \right\}$$

に比例した分布を示している。この状態は、基板の左端に第 2 の定在波の腹があり、他方の端に節があるということを示している。

即ち、第 1 及び第 2 の給電点 2 0 a、2 0 b 間の距離が、波長短縮率を考慮した使用電力の波長 λ の四分の一の奇数 N 倍、即ち、 $N \cdot \lambda / 4$ に設定されているので、基板の左端に第 2 の定在波の腹があり、右側の端に節があるという状態がえられる。

40

【 0 0 8 4 】

上記正弦的な膜厚分布を製膜する際、第 1 及び第 2 の給電点 2 0 a、2 0 b 間の距離と、第 1 及び第 2 の給電点 2 1 a、2 1 b 間の距離が、それぞれ、波長短縮率を考慮した波長 λ の四分の一の奇数倍の値に合致していること、及びその位置は一対の電極の端部であることから、一対の電極の両端部を腹、あるいは節とする定在波が発生し易いという共鳴現象が現れる。

この共鳴現象には、上述した通り、安定したプラズマ生成が容易であることに加えて、供給電力がプラズマ生成に効果的に消費されるという作用を有することを意味している。

【 0 0 8 5 】

ところで、上記ステップ 3 において、正弦的な膜厚分布と供給電力の位相 ϕ の関係

50

を把握する際に得られる正弦的な膜厚分布は、図8(b)に示された分布で合った。しかしながら、図8(b)に示された正弦的な膜厚分布以外にも、例えば、図9(b)に示される正弦的な膜厚分布も安定して生成できるパターンである。

図9(b)は、同図の点線の位置が基板11の中央点である場合に、該中央点に第2の定在波の節がある状態である。

したがって、上記ステップ3では、正弦的な膜厚分布の最大厚み位置と電力供給系の位相差2の関係を把握する際に、第2の定在波のモードとして、図8及び図9にそれぞれに示される第2の定在波のモードを選ぶことができる。

【0086】

(ステップ4)

前記ステップ1~3の結果を受けて、目的とするi型微結晶シリコン膜の製膜のステップに入る。先ず、図1~図4において、予め、基板11を第2の電極4の上に設置し、図示しない真空ポンプ10を稼働させ、真空容器1内の不純物ガス等を除去した後、原料ガス供給管8からSiH₄ガスを、0.8~1.0SLM(標準状態換算でのガス流量:L/分)、例えば0.8SLM、水素を5.0SLMで供給しつつ、圧力を5.0Torr(665Pa)に維持する。基板温度は100~350の範囲、例えば220に保持する。

基板11のサイズは、長さ1.5m×幅0.25m(厚み4mm)とする。

次に、前記第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力を、周波数84MHzの正弦波の位相差をステップ2で得られたデータで把握した1を設定し、即ち、図8(a)あるいは図9(a)に示される第1の定在波のモードを得るための1の中から、ここでは例えば、図8(a)に示される第1の定在波のモードを得るための1を選び、かつ、そのパルス変調を図5及び図6に示すW11(t)及びW12(t)におけるパルス幅Hw及び周期T0を、例えばHw=400μ秒及びT0=1m秒に設定し、第1及び第2の電力を、それぞれ500Wとして、第1及び第3の給電点20a、21aと、第2及び第4の給電点20b、21bとに供給する。

そして、第2のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25bの2つの出力、即ち周波数84MHzの正弦波の位相差をステップ3で得られたデータで把握した2に設定し、即ち、図8(b)あるいは図9(b)に示される第2の定在波のモードを得るための2の中から、ここでは例えば、図8(b)に示される第2の定在波のモードを得るための2を選び、かつ、そのパルス変調を図5及び図6に示すW21(t)及びW22(t)におけるパルス幅Hw及び周期T0を例えばHw=400μ秒及びT0=1m秒で、かつ、前記W11(t)及びW12(t)のパルス変調のパルス立ち上がり時間より半周期、即ちT0/2遅れた時刻に立ち上がるように設定し、第3及び第4の電力を、それぞれ500Wとして、第1及び第3の給電点20a、21aと、第2及び第4の給電点20b、21bに供給する。

ここで、上記Hw、T0及びパルス変調のパルス立ち上がり時間を上記の数値から変更して製膜していくつかの製膜データを比較することができる。

【0087】

一对の電極2、4間に4つの電力が供給されると、前述のように、W11(x,t)とW12(x,t)は干渉して第1の定在波W1(x,t)を形成し、W21(x,t)とW22(x,t)は干渉して第2の定在波W2(x,t)を形成する。

ただし、W11(x,t)は、W21(x,t)及びW22(x,t)とは、時間的に分離されているので干渉しない。また、同様に、W12(x,t)は、W21(x,t)及びW22(x,t)と干渉しない。

したがって、上記パルス変調の周期T0より大幅に長い数秒以上の一般的な製膜時間であれば、一对の電極2、4間に生成される電力の強さの分布は、第1の定在波W1(x,t)の強さの分布I1(x,t)と第2の定在波W2(x,t)の強さの分布I2(x,t)の重ね合わせた形となる。その様子を概念的に図7に示す。

ここで、基板の中央点をx軸の原点とし、第1の給電点20a側から第2の給電点20

10

20

30

40

50

b の方向を正の方向とすると、第 1 の定在波 $W_1(x, t)$ の強さの分布 $I_1(x, t)$ は、比例定数を A とすると、

$$I_1(x, t) = A \cos^2 \{ 2x / \lambda \}$$

第 2 の定在波 $W_2(x, t)$ の強さの分布 $I_2(x, t)$ は、

$$I_2(x, t) = A \sin^2 \{ 2x / \lambda \}$$

一対の電極 2、4 間に生成される電力の強さの分布 $I(x, t)$ は、

$$\begin{aligned} I(x, t) &= A \cos^2 \{ 2x / \lambda \} + A \sin^2 \{ 2x / \lambda \} \\ &= A \end{aligned}$$

この結果は、該一対の電極 2、4 間に生成される電力の強さの分布 $I(x, t)$ は、 x 10
即ち電力の伝播方向の位置に依存しないで一定の値であり、均一であるということを示している。また、周波数に依存しないで、一樣になることを示している。

このことは、上記プラズマの生成方法は、定在波の影響を受けない方法、即ち定在波フリーのプラズマ生成方法であるということが出来る。

【0088】

SiH_4 ガスがプラズマ化されると、そのプラズマ中に存在する SiH_3 、 SiH_2 、 SiH 、 H 等のラジカルが拡散現象により拡散し、基板 11 の表面に吸着されることにより i 型微結晶シリコン膜が堆積するが、一対の電極 2、4 間の電力の分布が、上述の通り、時間平均的に一樣であるので、その堆積膜は一樣になる。

このことは、本発明の装置及び方法では、波長 λ の二分の一を越えるサイズの基板を対象にした場合においても、一樣な膜厚分布の形成が可能であることを示している。即ち、従来の VHF プラズマ表面処理装置及び方法では不可能視されている波長 λ の二分の一を越えるサイズの基板を対象にした場合でも、本発明は一樣な膜厚分布の形成が実現可能であるということの意味している。 20

また、第 1 及び第 2 の給電点 20a、20b 間の距離と、第 3 及び第 4 の給電点 21a、21b 間の距離が、それぞれ、波長短縮率を考慮した波長 λ の二分の一の整数倍の値に合致していること、及びその位置は一対の電極の端部であることから、一対の電極の両端部を腹、あるいは節とする定在波が発生し易いという特徴がある。

即ち、このことは、安定したプラズマ生成が容易であることに加えて、供給電力がプラズマ生成に効果的に消費されるということの意味している。 30

したがって、上記のことは VHF プラズマ CVD 装置の応用分野においては画期的な発見であり、その実用価値は著しく大きいものがある。

【0089】

上記ステップ 4 において製膜される i 型微結晶シリコン膜の製膜速度は、供給電力密度 $4 \text{ KW} / \text{m}^2$ ($2 \text{ KW} / 0.495 \text{ m}^2$) において、 $3.0 \sim 3.5 \text{ nm} / \text{s}$ が得られる。

また、供給電力密度 $3.23 \text{ KW} / \text{m}^2$ ($1.6 \text{ KW} / 0.495 \text{ m}^2$) においては、 $2.5 \sim 2.8 \text{ nm} / \text{s}$ 程度が得られる。

上記製膜速度 $3.0 \sim 3.5 \text{ nm} / \text{s}$ に対する供給電力密度 $4 \text{ KW} / \text{m}^2$ ($2 \text{ KW} / 0.495 \text{ m}^2$)、及び上記製膜速度 $2.5 \sim 2.8 \text{ nm} / \text{s}$ 程度に対する供給電力密度 $3.23 \text{ KW} / \text{m}^2$ ($1.6 \text{ KW} / 0.495 \text{ m}^2$) は、それぞれ、従来技術での供給電力密度に比べて小さい数値になっている。 40

このことは、上述した共鳴現象の作用により、一対の電極への電力を供給する際の電力損失を抑制した電力供給が実現されていることを意味している。

【0090】

本発明の第 1 の実施形態では、第 1 の電極サイズ $1.6 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ (厚み、 20 mm)、第 2 の電極サイズ $1.6 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ (厚み 150 mm) であるので、基板サイズは上記 $1.5 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times$ 厚み 4 mm 程度に制約されるが、第 1 の電極 2 の個数を増加し、第 2 の電極サイズを増大し、且つ、第 1 の電極 2 の個数と同じ台数の電力供給装置 (図 1 図示の電力供給系) を設置すれば、基板サイズの幅は拡大可能であることは当然のこと 50

とである。

【 0 0 9 1 】

また、集積化タンデム型太陽電池の製造では、膜厚分布として $\pm 10\%$ 以内であれば性能上問題はない。上記実施例によれば、 84MHz の電源周波数を用いても、従来の技術では不可能であった該一对の電極2、4間の電力の強さの分布 $I(x, t)$ の均一化が可能である。即ち、膜厚分布として $\pm 10\%$ 以内を実現可能である。

このことは、薄膜シリコン太陽電池、薄膜トランジスタおよび感光ドラム等の製造分野での生産性向上および低コスト化に係わる工業的価値が著しく大きいことを意味している。

【 0 0 9 2 】

(実施例2)

次に、本発明の第2の実施形態に係わるプラズマCVD装置及びプラズマCVD法を図10ないし図13を参照して説明する。

図10は、本発明の第2の実施形態に係わるプラズマCVD装置の全体を示す概略図、図11は、平衡不平衡変換装置と2本の同軸ケーブルを組み合わせた平衡伝送回路を用いた電極への電力供給手段の詳細を示す説明図、図12は、図11図示の平衡伝送回路を用いた電極への電力供給手段での高周波電流の流れの概念を示す説明図、図13は、2枚の平行平板からなる平衡伝送回路の一例を示す説明図である。

【 0 0 9 3 】

先ず、装置の構成について説明する。ただし、本発明の第1の実施形態に係わるプラズマCVD装置及に示した部材と同じ部材は同符番を付して説明を省略する。

【 0 0 9 4 】

最初に、装置の概念を説明する。本発明の第2の実施形態に係わる装置の構成は、全体的には第1の実施形態での図1図示の装置の場合と同じであるが、図10及び図11図示の装置構成において、第1の整合器31aと第1及び第3の給電点20a、21aの間、第2の整合器31bと第2及び第4の給電点20b、21bの間に、LCブリッジ型平衡不平衡変換装置及び平衡伝送回路から成る平衡不平衡変換装置が挿入されていることが特徴である。

【 0 0 9 5 】

ここで、上記LCブリッジ型平衡不平衡変換装置の出力を給電点に接続する平衡伝送線路としては、以下に説明する2本の同軸ケーブルを用いる方法の他に、例えば、2枚の平行平板を用いる平衡伝送線路でも良い。

また、LCブリッジ型平衡不平衡変換装置の代わりに、トランス方式の平衡不平衡変換装置を用いても良い。

なお、LCブリッジ型平衡不平衡変換装置及び平衡伝送回路から成る平衡不平衡変換装置、あるいは、トランス方式平衡不平衡変換装置及び平衡伝送回路をインピーダンス整合器と給電点の間に挿入すると、特許文献5に示されているように、即ち、図15に示されるように、漏洩電流発生を抑制した形で一对の電極間のみを高周波電力を供給可能であり、無効な電力消費を抑制可能な有力な手段となる。

【 0 0 9 6 】

図10及び図11において、一对の電極2、4への高周波電力を給電する位置である給電点は、本発明の第1の実施形態に係わる装置の場合と同様に、高周波電力波の伝播上での対向点となる関係にある位置である該電極の両端部とし、第1の電極2に、第1の給電点20a及び第2の給電点20bを配置する。そして、第2の電極4には、第3の給電点21a及び第3の給電点21bを配置する。

【 0 0 9 7 】

上記第1及び第2の給電点20a、20bの間隔は、波長短縮率を考慮した使用電力の波長 λ の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N \cdot \lambda / 4$ に設定する。また、同様に、上記第3及び第4の給電点21a、21bの間隔は、波長短縮率を考慮した使用電力の波長 λ の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N \cdot \lambda / 4$ に設定する。

10

20

30

40

50

ここでは、前述の本発明の第1の実施形態に係わるプラズマCVD装置の場合と同様に、上記第1と第2の給電点20a、20bの間隔、及び上記第3及び第4の給電点21a、21bの間隔を、それぞれ、1.6mに設定する。

なお、使用電力の周波数は、例えば84MHzとし、波長短縮率 λ/λ_0 を0.6(即ち、 $\lambda = 0.6 \times 3.57\text{m} = 2.142\text{m}$)と見込み、 $N/\lambda = 3 \times 2.142\text{m}/4 = 1.6\text{m}$ としている。

ただし、 λ は使用電力のプラズマ生成時の波長、 λ_0 は周波数84MHzの電磁波の真空中での波長である。

【0098】

図10及び図11において、第1の定在波を発生させる装置の構成は次の通りである。 10

第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力の一方、即ち出力端子26aの出力信号は、第1の結合器28a、第1の増幅器29a、同軸ケーブル30a、第1の整合器31a、第1の同軸ケーブル32a、第1のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40a、該第1のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40aの2つの出力端子にそれぞれ接続された第5及び第6の同軸ケーブル41a、41b、該第5及び第6の同軸ケーブル41a、41bに第3の電流導入端子42を介して、それぞれが接続された第7及び第8の同軸ケーブル43a、43b、そして、該第7及び第8の同軸ケーブル43a、43bの芯線43a、43bを介して、それぞれ第1及び第3の給電点20a、21aに供給される。

なお、第8の同軸ケーブル43bの芯線44bは、図11に示しているように、絶縁部材51a、接続部材52aを用いて、第3の給電点に接続される。また、該第7及び第8の同軸ケーブル43a、43bの外部導体は第1の外部導体接続金具53aで短絡される。 20

ここで、第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの出力端子26aの出力信号が第1の増幅器29aで増幅されて、第1の整合器31a及び第1のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40a等を介して第1及び第3の給電点20a、21aに供給される電力を、本発明の第1の実施形態に係わる装置の場合と同様に、第1の電力と呼ぶ。

【0099】

第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力の他方、即ち出力端子26bの出力信号は、第2の結合器28b、第2の増幅器29b、同軸ケーブル30b、第2の整合器31b、第2の同軸ケーブル32b、第2のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40b、該第2のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40bの2つの出力端子にそれぞれ接続された第9及び第10の同軸ケーブル46a、46b、該第9及び第10の同軸ケーブル46a、46bに第4の電流導入端子47を介して、それぞれが接続された第11及び第12の同軸ケーブル48a、48b、そして、該第11及び第12の同軸ケーブル48a、48bの芯線49a、49bを介して、それぞれ第2及び第4の給電点20b、21bに供給される。 30

なお、第12の同軸ケーブル48bの芯線49bは、図11に示しているように、絶縁部材51b、接続部材52bを用いて、第4の給電点21bに接続される。また、該第11及び第12の同軸ケーブル48a、48bの外部導体は第2の外部導体接続金具53b 40
で短絡される。

ここで、第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの出力端子26bの出力信号が第2の増幅器29bで増幅されて、第2の整合器31b及び第2のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40b等を介して第2及び第4の給電点20b、21bに供給される電力を、本発明の第1の実施形態に係わる装置の場合と同様に、第2の電力と呼ぶ。

【0100】

図10及び図11において、第2の定在波を発生させる装置の構成は次の通りである。

第2のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25bの2つの出力の一方、即ち出力端子27aの出力信号は、第1の結合器28a、第1の増幅器29a、同軸ケーブル30a、第1の整合器31a、第1の同軸ケーブル32a、第1のLCブリッジ型平衡不平衡変 50

換装置 40 a、該第 1 の LCブリッジ型平衡不平衡変換装置 40 a の 2 つの出力端子にそれぞれ接続された第 5 及び第 6 の同軸ケーブル 41 a、41 b、該第 5 及び第 6 の同軸ケーブル 41 a、41 b に第 3 の電流導入端子 42 を介して、それぞれが接続された第 7 及び第 8 の同軸ケーブル 43 a、43 b、そして、該第 7 及び第 8 の同軸ケーブル 43 a、43 b の芯線 43 a、43 b を介して、それぞれ第 1 及び第 3 の給電点 20 a、21 a に供給される。

なお、第 8 の同軸ケーブル 43 b の芯線 44 b は、図 11 に示しているように、絶縁部材 51 a、接続部材 52 a を用いて、第 3 の給電点に接続される。また、該第 7 及び第 8 の同軸ケーブル 43 a、43 b の外部導体は第 1 の外部導体接続金具 53 a で短絡される。

10

ここで、第 2 のパルス変調方式位相可変 2 出力の発信器 26 a の出力端子 27 a の出力信号が第 1 の増幅器 29 a で増幅されて、第 1 の整合器 31 a 及び第 1 の LCブリッジ型平衡不平衡変換装置 40 a 等を介して第 1 及び第 3 の給電点 20 a、21 a に供給される電力を、本発明の第 1 の実施形態に係わる装置の場合と同様に、第 3 の電力と呼ぶ。

【0101】

第 2 のパルス変調方式位相可変 2 出力の発信器 26 a の 2 つの出力の他方、即ち出力端子 27 b の出力信号は、第 2 の結合器 28 b、第 2 の増幅器 29 b、同軸ケーブル 30 b、第 2 の整合器 31 b、第 2 の同軸ケーブル 32 b、第 2 の LCブリッジ型平衡不平衡変換装置 40 b、該第 2 の LCブリッジ型平衡不平衡変換装置 40 b の 2 つの出力端子にそれぞれ接続された第 9 及び第 10 の同軸ケーブル 46 a、46 b、該第 9 及び第 10 の同軸ケーブル 46 a、46 b に第 4 の電流導入端子 47 を介して、それぞれが接続された第 11 及び第 12 の同軸ケーブル 48 a、48 b、そして、該第 11 及び第 12 の同軸ケーブル 48 a、48 b の芯線 49 a、49 b を介して、それぞれ第 2 及び第 4 の給電点 20 b、21 b に供給される。

20

なお、第 12 の同軸ケーブル 48 b の芯線 49 b は、図 11 に示しているように、絶縁部材 51 b、接続部材 52 b を用いて、第 4 の給電点に接続される。また、該第 11 及び第 12 の同軸ケーブル 48 a、48 b の外部導体は第 2 の外部導体接続金具 53 b で短絡される。

ここで、第 2 のパルス変調方式位相可変 2 出力の発信器 25 b の出力端子 27 b の出力信号が第 2 の増幅器 29 b で増幅されて、第 2 の整合器 31 b 及び第 2 の LCブリッジ型平衡不平衡変換装置 40 b 等を介して第 2 及び第 4 の給電点 20 b、21 b に供給される電力を、本発明の第 1 の実施形態に係わる装置の場合と同様に、第 4 の電力と呼ぶ。

30

【0102】

ここで、上述した通り、上記 LCブリッジ型平衡不平衡変換装置の出力を給電点に接続する平衡伝送線路としては、2 本の同軸ケーブルを用いる方法の他に、例えば、2 枚の平行平板を用いる平衡伝送線路でも良い。

また、LCブリッジ型平衡不平衡変換装置の代わりに、トランス方式の平衡不平衡変換装置を用いても良い。

なお、LCブリッジ型平衡不平衡変換装置及び平衡伝送回路から成る平衡不平衡変換装置、あるいは、トランス方式平衡不平衡変換装置及び平衡伝送回路をインピーダンス整合器と給電点の間に挿入すると、特許文献 5 に示されているように、即ち、図 15 に示されるように、漏洩電流発生を抑制した形で一对の電極間のみを高周波電力を供給可能であり、無効な電力消費を抑制可能な有力な手段となる。

40

【0103】

上記第 1 の給電点 20 a と第 2 の給電点 20 b との間隔、及び第 3 の給電点 21 a と第 4 の給電点 21 b の間隔が、それぞれ、波長短縮率を考慮した使用電力の波長の四分の一の奇数 N 倍、即ち、 $N/4$ に設定されることによる作用について、説明する。

上記第 1 の電力が、第 1 及び第 3 の給電点 20 a、21 a を介して一对の電極 2、4 に供給されると、その電力波は、進行波として、第 1 の給電点 20 a 側から第 2 の給電点 20 b 側へ伝播する。そして、その電力波が第 2 及び第 4 の給電点 20 b、21 b が設置さ

50

れている一対の電極の端部に到達すると、該端部はインピーダンスの不連続部分であることから、その端部で反射が起こる。その反射波は、第2の給電点20bから第1の給電点20aを向いた方向へ伝播する。

もしも、上記第1の電力の進行波が該第2及び第4の給電点20b、21bが設置されている一対の電極の端部で反射しないとすれば、該進行波は第2のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40b及び第2の同軸ケーブル32bを伝播して第2の整合器31bに到達する。そして、該第2の整合器31bで反射して戻ってくる。この場合、第2の給電点20bと第2の整合器31bの間で電力が消費されるという問題、即ち、一対の電極2、4間でのプラズマ生成以外での電力消費という問題が残る。

上記第1の給電点20a側から供給された電力の進行波と第2の給電点20b側の一対の電極の端部で反射した反射波が重なり合うと干渉現象により、定在波を発生する。この場合、上記進行波の供給地点と反射波の発生地点の間の距離が、波長短縮率を考慮した使用電力の波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定されているので、発生する定在波の腹が上記進行波の供給地点に、節は反射波の発生地点に発生し易いという現象が現れる。同様に、発生する定在波の節が上記進行波の供給地点及び、腹が反射波の発生地点に発生し易いという現象が現れる。なお、この現象は、音響工学分野で起こる共鳴現象に似た現象である。

なお、上記の場合は、給電点の間隔が波長の二分の一の整数n倍、即ち、 $n/2$ に設定される場合に比べて、定在波の生成が容易に行える。

上記第1の電力の進行波とその反射波の共鳴現象に似た現象により、該一対の電極間以外での消費が減少するという作用が生まれる。即ち、該一対の電極への電力供給線路における電力損失が最小限に抑制されるという作用がある。

同様に、上記第2の電力が、第2及び第4の給電点20b、21bを介して一対の電極2、4に供給されると、その電力波は、進行波として、第2の給電点20b側から第1の給電点20a側へ伝播する。そして、その電力波が第1及び第3の給電点20a、21aが設置されている一対の電極の端部に到達すると、該端部はインピーダンスの不連続部分であることから、該端部で反射が起こる。その反射波は、第1の給電点20aから第2の給電点20bを向いた方向へ伝播する。

もしも、上記第2の電力の進行波が該第1及び第3の給電点20a、21aが設置されている一対の電極の端部で反射しないとすれば、該進行波は第1のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40a及び第1の同軸ケーブル32aを伝播して第1の整合器31aに到達する。そして、該第1の整合器31aで反射して戻ってくる。この場合、第1の給電点20aと第1の整合器31aの間で電力が消費されるという問題、即ち、一対の電極2、4間でのプラズマ生成以外での電力消費という問題が残る。

上記進行波と第1の給電点20a側の一対の電極の端部で反射した反射波が重なり合うと干渉現象により、定在波を発生する。この場合、上記進行波の供給地点と反射波の発生地点の間の距離が、波長短縮率を考慮した使用電力の波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定されているので、発生する定在波の腹が上記進行波の供給地点に、節が反射波の発生地点に発生し易いという現象が現れる。同様に、発生する定在波の節が上記進行波の供給地点に、腹が反射波の発生地点に発生し易いという現象が現れる。なお、この現象は、音響工学分野で起こる共鳴現象に似た現象である。

なお、上記の場合は、給電点の間隔が波長の二分の一の整数n倍、即ち、 $n/2$ に設定される場合に比べて、定在波の生成が容易に行える。

上記第2の電力の進行波とその反射波の共鳴現象に似た現象により、該一対の電極間以外での消費が減少するという作用が生まれる。即ち、該一対の電極への電力供給線路における電力損失が最小限に抑制されるという作用がある。

なお、第3及び第4の電力の供給においても、上記と同様に、第3及び第4の電力の進行波とその反射波の共鳴現象に似た現象により、それぞれ、該一対の電極への電力供給線路における電力損失が最小限に抑制されるという作用がある。

【0104】

10

20

30

40

50

次に、上記構成を有するプラズマCVD装置を用いて、集積化タンデム型薄膜太陽電池用i型微結晶シリコン膜を製膜する方法を説明する。

i型微結晶シリコン膜の製膜に際し、原料ガス、圧力、投入すべき電力の密度及び基板温度については、公知の知見、例えば特許文献1及び非特許文献1に記載の条件を採用する。

しかしながら、上記構成を有するプラズマCVD装置に係わる特有の諸条件は、以下に示す手順で、予め確認し、調整することが必要である。その後、目的とするi型微結晶シリコン膜の製膜を行う。

【0105】

(ステップ1) 目的とするi型微結晶シリコン膜の製膜条件中、原料ガス、圧力、投入すべき電力の密度及び基板温度は、公知の知見を採用し、その条件における一对の電極2、4間を伝播する電力の波長を測定する。その測定データを基に、第1及び第2の給電点20a、20bの間の距離が電力の波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ に設定されていることを確認する。

10

(ステップ2) 前記第1及び第2の電力を一对の電極2、4に供給して発生させる第1の定在波の腹の位置の調整に必要なデータの把握、即ち、前記第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力の位相差の設定値と第1の定在波の腹の位置との関係を把握する。

(ステップ3) 前記第3及び第4の電力を一对の電極2、4に供給して発生させる第2の定在波の腹の位置の調整に必要なデータの把握、即ち、前記第2のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25bの2つの出力の位相差の設定値と第2の定在波の腹の位置との関係を把握する。

20

(ステップ4) 第1の定在波と第2の定在波を発生させ、目的とするi型微結晶シリコン膜の製膜を行う。

【0106】

(ステップ1)

図10及び図11において、予め、基板11を第2の電極4の上に設置し、図示しない真空ポンプ10を稼働させ、真空容器1内の不純物ガス等を除去した後、原料ガス供給管8からSiH₄ガスを、0.8~1.0SLM(標準状態換算でのガス流量:L/分)、例えば0.8SLM、水素を5.0SLMで供給しつつ、圧力を5.0Torr(665Pa)に維持する。基板温度は100~350の範囲、例えば220に保持する。

30

なお、基板11のサイズは、第1の電極のサイズに合わせて、長さ1.6m×幅0.3m(厚み4mm)とする。

次に、前記第1の電力と第2の電力の周波数を84MHz、パルス幅Hw=250μ秒、パルス周期T0=1m秒、電力は、合計で500~1000W、例えば、500Wを供給する。なお、パルス幅Hwが250μ秒、パルス周期T0が1m秒であるので、デューティ比は250μ秒/1m秒=0.25である。

即ち、第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力の位相差を、例えば零に、パルス幅Hw=250μ秒、パルス周期T0=1m秒に設定し、第1の電力増幅器29aの出力を250Wに設定して、その出力を第1の整合器31a、第1の同軸ケーブル32a、第1のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40a、該第1のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40aの2つの出力端子にそれぞれ接続された第5及び第6の同軸ケーブル41a、41b、該第5及び第6の同軸ケーブル41a、41bに第3の電流導入端子42を介して、それぞれが接続された第7及び第8の同軸ケーブル43a、43b、そして、該第7及び第8の同軸ケーブル43a、43bの芯線43a、43bを介して、第1及び第3の給電点20a、21aに供給するとともに、第2の電力増幅器29bの出力を250Wに設定して、その出力を第2の整合器31b、第2の同軸ケーブル32b、第2のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40bの2つの出力端子にそれぞれ接続された第9及び第10の同軸ケーブル46a、46b、該第9及び第10の同軸ケーブル4

40

50

6 a、4 6 bに第4の電流導入端子4 7を介して、それぞれが接続された第1 1及び第1 2の同軸ケーブル4 8 a、4 8 b、そして、該第1 1及び第1 2の同軸ケーブル4 8 a、4 8 bの芯線4 9 a、4 9 bを介して、第2及び第4の給電点2 0 b、2 1 b間に供給する。

この場合、第1の整合器3 1 a及び第2の整合器3 1 bを調整することにより、それぞれの整合器3 1 a、3 1 bの上流側に上記供給電力の反射波が戻らないように、即ち、図4図示のPrが戻らないようにすることができる。一般的には、第1及び第2のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置4 0 a、4 0 bが下流側に配置された場合においても、反射波Prは進行波Pfの1～3%程度に抑えることができる。

【0107】

上記の条件で、4～6分程度の時間、プラズマを生成すると、基板1 1にi型微結晶シリコン膜が堆積する。製膜後、真空容器1から前記基板1 1を取り出して、該i型微結晶シリコン膜の膜厚み分布を評価する。

基板1 1に堆積されたi型微結晶シリコン膜の膜厚分布は、後述するように、VHFプラズマ固有の現象である定在波の発生により、正弦的な分布となる。

このような、製膜試験を第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器2 5 aの2つの出力の位相差をパラメータに、例えば、5～6回実施する。

そして、第1及び第2の給電点2 0 a、2 0 bを結ぶ方向において、定在波の腹の間隔を測定する。即ち、基板1 1に堆積されたi型微結晶シリコン膜の膜厚が最大である位置と、その隣にある膜厚が最大である位置間の距離を測定する。

なお、この間隔は、使用電力のプラズマ生成時の波長 λ_0 の二分の一の値であることを意味する。

【0108】

上記測定結果より、使用電力の波長短縮率及び上記第1及び第2の給電点の間の距離の設定値 = 1.6 mについて評価する。

上記測定結果において、上記定在波の腹の間隔が1 0 7 0 mmと異なる場合、例えば、上記定在波の腹の間隔が1 1 8 0 mmの場合、使用電力のプラズマ生成時の波長 λ_0 = 1 1 8 0 mm \times 2 = 2 3 6 0 mmである。この場合、使用電力の波長短縮率 λ/λ_0 は、

$$\lambda/\lambda_0 = 2360 \text{ mm} / 3570 \text{ mm} = 0.66$$

であることが判る。ただし、 λ_0 は使用電力のプラズマ生成時の波長、 f_0 は周波数8 4 M Hzの電磁波の真空中での波長である。

この場合は、上記第1及び第2の給電点の間の距離の設定値 = 1.6 mが、波長短縮率を考慮した波長 λ の四分の一の奇数N倍、即ち、 N/λ の値に合致しないので、その設定値1.6 mを、例えば1 7 6 7 mmに変更することが必要である。

あるいは、使用電力の波長短縮率 λ/λ_0 が0.66であることが確認できたので、このデータを活用して、周波数8 4 M Hzを9 2 M Hzに変更することでも良い。

即ち、周波数9 2 M Hzの電磁波の真空中での波長は3.26 mであること、及び使用電力の波長短縮率 λ/λ_0 が0.66であることを考慮すると、上記プラズマ生成時での周波数9 2 M Hzの波長 λ は、 $\lambda = 0.66 \times 3.26 \text{ m} = 2.151 \text{ m}$ である。即ち、 $N/\lambda = 3 \times 2.151 \text{ m} / 4 = 1.61 \text{ m} = 1.6 \text{ m}$ である。

【0109】

ステップ1においては、上述の通り、i型微結晶シリコン膜の製膜条件における使用電力の波長を測定し、そのデータを基に、第1及び第2の給電点2 0 a、2 0 b間の距離が、使用電力のプラズマ生成時の波長 λ の四分の一の奇数N倍、即ち、 N/λ であることを確認する。また、測定された使用電力の波長短縮率を確認する。

第1及び第2の給電点2 0 a、2 0 b間の距離が、使用電力のプラズマ生成時の波長 λ の四分の一の奇数N倍、即ち、 N/λ の値になっていない場合は、その条件を満たすように、上記第1及び第2の給電点2 0 a、2 0 b間の距離を再設定する。または、上記条件を満たすように、プラズマ生成電力の周波数を変更する。

10

20

30

40

50

ここでは、第1及び第2の給電点間の距離の設定値 = 1.6 mが波長短縮率を考慮した波長の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N/4$ の値に合致しなかったとして、上記条件を満たす為に、周波数の変更を行う。即ち、84 MHzを92 MHzに変更する。

上記製膜条件においては、波長短縮率 $\lambda/\lambda_0 = 0.66$ であることが把握できたので、周波数を92 MHz（電磁波の真空中での波長は3.26 m）として、第1及び第2の給電点20 a、20 b間の距離の設定値 = 1.6 mが、 $3 \times \lambda/4 = 3 \times 2151 \text{ mm}/4 = 1.6 \text{ m} =$ 波長短縮率を考慮した波長の二分の一の整数倍の値にほぼ合致する。なお、上記プラズマ生成時での周波数92 MHzの波長 $\lambda = 0.66 \times 3.26 \text{ m} = 2151 \text{ mm}$ である。

第3及び第4の給電点21 a、21 b間の距離の設定値 = 1.6 mも、上記と同様である。

10

【0110】

（ステップ2）

図10及び図11において、予め、基板11を第2の電極4の上に設置し、図示しない真空ポンプ10を稼働させ、真空容器1内の不純物ガス等を除去した後、原料ガス供給管8からSiH₄ガスを、0.8 ~ 1.0 SLM（標準状態換算でのガス流量：L/分）、例えば0.8 SLM、水素を5.0 SLMで供給しつつ、圧力を5.0 Torr（665 Pa）に維持する。基板温度は100 ~ 350 の範囲、例えば220 に保持する。

基板11のサイズは、長さ1.5 m × 幅0.25 m（厚み4 mm）とする。なお、第1の電極のサイズより小さくするのは、電極の端部では、エッジ効果によりプラズマの強さに再現性がない場合があるという経験的な知見に基づくものである。

20

次に、前記第1の電力と第2の電力の周波数を92 MHz、パルス幅Hw = 250 μ秒、パルス周期T0 = 1 m秒、電力は、合計で500 ~ 1000 W、例えば、500 Wを供給する。なお、パルス幅Hwが250 μ秒、パルス周期T0が1 m秒であるので、デューティ比は250 μ秒 / 1 m秒 = 0.25である。

即ち、第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25 aの2つの出力の位相差を、例えば零に、パルス幅Hw = 250 μ秒、パルス周期T0 = 1 m秒に設定し、第1の電力増幅器29 aの出力を250 Wに設定して、その出力を第1の整合器31 a、第1の同軸ケーブル32 a、第1のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40 a、該第1のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40 aの2つの出力端子にそれぞれ接続された第5及び第6の同軸ケーブル41 a、41 b、該第5及び第6の同軸ケーブル41 a、41 bに第3の電流導入端子42を介して、それぞれが接続された第7及び第8の同軸ケーブル43 a、43 b、そして、該第7及び第8の同軸ケーブル43 a、43 bの芯線43 a、43 bを介して、第1及び第3の給電点20 a、21 aに供給するとともに、第2の電力増幅器29 bの出力を250 Wに設定して、その出力を第2の整合器31 b、第2の同軸ケーブル32 b、第2のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40 bの2つの出力端子にそれぞれ接続された第9及び第10の同軸ケーブル46 a、46 b、該第9及び第10の同軸ケーブル46 a、46 bに第4の電流導入端子47を介して、それぞれが接続された第11及び第12の同軸ケーブル48 a、48 b、そして、該第11及び第12の同軸ケーブル48 a、48 bの芯線49 a、49 bを介して、第2及び第4の給電点20 b、21 b間に供給する。

30

40

この場合、第1の整合器31 a及び第2の整合器31 bを調整することにより、それぞれの整合器31 a、31 bの上流側に上記供給電力の反射波が戻らないように、即ち、図4図示のPrが戻らないようにすることができる。一般的には、第1及び第2のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40 a、40 bが下流側に配置された場合においても、反射波Prは進行波Pfの1 ~ 3 %程度に抑えることができる。

【0111】

上記の条件で、4 ~ 6分程度の時間、プラズマを生成すると、基板11にi型微結晶シリコン膜が堆積する。基板11に堆積されたi型微結晶シリコン膜の膜厚分布は、以下に

50

説明するように、VHFプラズマ固有の現象である定在波の発生により、正弦的な分布となる。

【0112】

上記第1及び第3の給電点20a、21aからパルス状に供給される第1の電力の電圧波と、上記第2及び第4の給電点20b、21bからパルス状に供給される第2の電力の電圧波は、同一電源から発振され、互いに電極間を伝播していくので、すなわち、両者は互いに向かい合った方向から伝播しあって重なり合うので、干渉現象が発生する。

ここで、第1及び第2の電極間に供給される第1及び第2の電力の電圧波について、説明する。

図12は、本発明の第2の実施形態に係わる装置に関する第1及び第3の給電点20a、21a及び一対の電極2、4の概念を示す説明図である。図12において、第7の同軸ケーブル43aの芯線44aとその外部導体間の電圧波 Y_a を、

$$Y_a(t) = \sin(t + 2x/\lambda)$$

と表すと、

第8の同軸ケーブル43bの芯線44bとその外部導体間の電圧波 Y_b は、平衡不平衡変換装置40aにより位相が180度遅れた関係に変換されているので、

$$Y_b(t) = \sin(t + 2x/\lambda + 180^\circ)$$

と表される。したがって、例えば、

第2の電極4を基準に、第1及び第2の電極間の電圧波の時間的変化を見れば、次のようになる。

$$Y(t) = Y_a(t) + Y_b(t) \\ = 2 \sin(t + 2x/\lambda)$$

即ち、第1及び第2の電極間には、第7及び第8の同軸ケーブル43a、43bの芯線とその外部導体間の電圧波 Y_a 及び Y_b の電圧の振幅値に比べてその2倍の振幅となる。

以下においては、第2の電極4を基準にした第1及び第2の電極間の電圧波の時間的変化、即ち、

$$Y(t) = Y_a(t) + Y_b(t) \\ = 2 \sin(t + 2x/\lambda)$$

の関係を考慮して説明する。

【0113】

図11において、第1の給電点20a側から第2の給電点20bの方向の距離を x とし、 x の正方向へ伝播する電圧波を $Y_{11}(x, t)$ 、 x の負方向へ伝播する電圧波、即ち第2の給電点21a側から第1の給電点20aの方向へ伝播する電圧波を $Y_{12}(x, t)$ とすると、次のように表現される。

$$Y_{11}(x, t) = 2V_1 \cdot \sin(t + 2x/\lambda)$$

$$Y_{12}(x, t) = 2V_1 \cdot \sin\{t - 2(x - L_0)/\lambda + \phi\}$$

ただし、 $2V_1$ は電圧波の振幅、 ω は電圧の角周波数、 λ は電圧波の波長、 t は時間、 L_0 は第1及び第2の給電点の間隔、 ϕ は第1の電力の電圧波と第2の電力の電圧波の位相差である。この2つの電圧波の合成波 $Y_1(x, t)$ は次式のようになる。

$$Y_1(x, t) = Y_{11}(x, t) + Y_{12}(x, t) \\ = 4 \cdot V_1 \cos\{2(x - L_0/2)/\lambda - \phi/2\} \cdot \sin\{t + (L_0/\lambda + \phi/2)\}$$

上記合成波 $Y_1(x, t)$ は、次に示すような性質を有する。即ち、 $\phi = 0$ の場合、生成されるプラズマの強さは給電点間の中央部($x = L_0/2$)が強く、該中央部から離れるにしたがって弱くなる。 $\phi > 0$ の場合、プラズマの強い部分が一方の給電点側へ移動し、 $\phi < 0$ の場合、他方の給電点側へ移動する。

なお、ここでは、 $Y_{11}(x, t)$ と $Y_{12}(x, t)$ の2つの電圧波の合成波を第1の定在波 $Y_1(x, t)$ と呼ぶ。

【0114】

一対の電極間の電力の強さは、電圧の合成波 $Y_1(x, t)$ の振幅値の二乗に比例する

10

20

30

40

50

。即ち、電力の強さ $I_1(x, t)$ は、

$$I_1(x, t) = \cos^2 \left\{ 2 \left(x - L_0 / 2 \right) / \lambda - \omega t / 2 \right\}$$

と表される。この $I_1(x, t)$ を概念的に、図 7 に実線（第 1 の定在波の強さの分布）で示す。

【0115】

さて、上記の条件で製膜後、真空容器 1 から前記基板 11 を取り出して、該 i 型微結晶シリコン膜の膜厚み分布を評価する。

基板 11 に堆積された i 型微結晶シリコン膜の膜厚分布は、前記のように、VHF プラズマ固有の現象である定在波の発生により、正弦的な分布となる。

このような、製膜試験を第 1 のパルス変調方式位相可変 2 出力の発信器 25 a の 2 つの出力の位相差をパラメータに繰り返し実施する。

そして、第 1 及び第 2 の給電点 20 a、20 b を結ぶ方向において、基板 11 の中央点から正弦的な膜厚分布の最大厚みの位置までの距離と、第 1 のパルス変調方式位相可変 2 出力の発信器 25 a の 2 つの出力の位相差の関係をデータとして把握する。

例えば、図 8 (a) の点線の位置が基板 11 の中央点である場合に、その中央点とそれより左側にある定在波の腹の位置との距離が $\lambda / 8$ であるという条件を満たすための位相差は、例えば 1 であることが把握される。なお、 $\lambda / 8 = 269 \text{ mm}$ である。

【0116】

上記正弦的な膜厚分布を製膜する際、第 1 及び第 2 の給電点 20 a、20 b 間の距離と、第 1 及び第 2 の給電点 21 a、21 b 間の距離が、それぞれ、波長短縮率を考慮した波長の四分の一の奇数 N 倍、即ち、 $N \lambda / 4$ の値に合致していること、及びその位置は一对の電極の端部であることから、一对の電極の両端部を腹、あるいは節とする定在波が発生し易いというあたかも共鳴現象が現れる。

この共鳴現象には、上述した通り、安定したプラズマ生成が容易であることに加えて、供給電力がプラズマ生成に効果的に消費されるという作用を有することを意味している。

なお、上記の場合は、給電点の間隔が波長の二分の一の整数 n 倍、即ち、 $n \lambda / 2$ に設定される場合に比べて、定在波の生成が容易に行える。

【0117】

（ステップ 3）

図 10 及び図 11 において、予め、基板 11 を第 2 の電極 4 の上に設置し、図示しない真空ポンプ 10 を稼働させ、真空容器 1 内の不純物ガス等を除去した後、原料ガス供給管 8 から SiH₄ ガスを、 $0.8 \sim 1.0 \text{ SLM}$ （標準状態換算でのガス流量：L/分）、例えば 0.8 SLM 、水素を 5.0 SLM で供給しつつ、圧力を 5.0 Torr （ 665 Pa ）に維持する。基板温度は $100 \sim 350$ の範囲、例えば 220 に保持する。

基板 11 のサイズは、長さ 1.5 m × 幅 0.25 m （厚み 4 mm ）とする。なお、第 1 の電極のサイズより小さくするのは、電極の端部では、エッジ効果によりプラズマの強さに再現性がない場合があるという経験的な知見に基づくものである。

次に、前記第 3 の電力と第 4 の電力の周波数を、 92 MHz 、パルス幅 $H_w = 250 \mu$ 秒、パルス周期 $T_0 = 1 \text{ m}$ 秒、電力は、合計で $500 \sim 1000 \text{ W}$ 、例えば、 500 W を供給する。

即ち、第 2 のパルス変調方式位相可変 2 出力の発信器 25 b の 2 つの出力の位相差を、例えば零に、パルス幅 $H_w = 250 \mu$ 秒、パルス周期 $T_0 = 1 \text{ m}$ 秒に設定し、第 1 の電力増幅器 29 a の出力を 250 W に設定して、その出力を第 1 の整合器 31 a、第 1 の同軸ケーブル 32 a、第 1 の LC ブリッジ型平衡不平衡変換装置 40 a、該第 1 の LC ブリッジ型平衡不平衡変換装置 40 a の 2 つの出力端子にそれぞれ接続された第 5 及び第 6 の同軸ケーブル 41 a、41 b、該第 5 及び第 6 の同軸ケーブル 41 a、41 b に第 3 の電流導入端子 42 を介して、それぞれが接続された第 7 及び第 8 の同軸ケーブル 43 a、43 b、そして、該第 7 及び第 8 の同軸ケーブル 43 a、43 b の芯線 43 a、43 b を介して、第 1 及び第 3 の給電点 20 a、21 a に供給するとともに、第 2 の電力増幅器 29 b

10

20

30

40

50

の出力を250Wに設定して、その出力を第2の整合器31b、第2の同軸ケーブル32b、第2のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40bの2つの出力端子にそれぞれ接続された第9及び第10の同軸ケーブル46a、46b、該第9及び第10の同軸ケーブル46a、46bに第4の電流導入端子47を介して、それぞれが接続された第11及び第12の同軸ケーブル48a、48b、そして、該第11及び第12の同軸ケーブル48a、48bの芯線49a、49bを介して、第2及び第4の給電点20b、21b間に供給する。

この場合、第1の整合器31a及び第2の整合器31bを調整することにより、それぞれの整合器31a、31bの上流側に上記供給電力の反射波が戻らないように、即ち、図4図示のPrが戻らないようにすることができる。一般的には、第1及び第2のLCブリッジ型平衡不平衡変換装置40a、40bが下流側に配置された場合においても、反射波Prは進行波Pfの1～3%程度に抑えることができる。

【0118】

上記の条件で、4～6分程度の時間、プラズマを生成すると、基板11にi型微結晶シリコン膜が堆積する。基板11に堆積されたi型微結晶シリコン膜の膜厚分布は、以下に説明するように、VHFプラズマ固有の現象である定在波の発生により、正弦的な分布となる。

【0119】

上記第1及び第3の給電点20a、21aからパルス状に供給される第3の電力の電圧波と、上記第2及び第4の給電点20b、21bからパルス状に供給される第4の電力の電圧波は、同一電源から発振され、互いに電極間を伝播していくので、すなわち、両者は互いに向かい合った方向から伝播しあって重なり合うので、干渉現象が発生する。

図10において、第1の給電点20a側から第2の給電点20bの方向の距離をxとし、xの正方向へ伝播する電圧波をY11(x, t)、xの負方向へ伝播する電圧波、即ち第2の給電点21a側から第1の給電点20aの方向へ伝播する電圧波をY12(x, t)とすると、次のように表現される。

$$Y_{21}(x, t) = 2V_1 \cdot \sin\left(\omega t + 2\pi x / \lambda\right)$$

$$Y_{22}(x, t) = 2V_1 \cdot \sin\left\{\omega t - 2\pi(x - L_0) / \lambda + \phi\right\}$$

ただし、2V1は電圧波の振幅、 ω は電圧の角周波数、 λ は電圧波の波長、tは時間、L0は第1及び第2の給電点の間隔、 ϕ は第3の電力の電圧波と第4の電力の電圧波の位相差である。この2つの電圧波の合成波Y2(x, t)は次式のようになる。

$$Y_2(x, t) = Y_{21}(x, t) + Y_{22}(x, t) \\ = 4 \cdot V_1 \cos\left\{2\pi(x - L_0 / 2) / \lambda - \phi / 2\right\} \cdot \sin\left\{\omega t + \left(\pi L_0 / \lambda + \phi / 2\right)\right\}$$

上記合成波Y2(x, t)は、次に示すような性質を有する。即ち、 $\phi = 0$ の場合、生成されるプラズマの強さは給電点間の中央部(x = L0/2)が強く、該中央部から離れるにしたがって弱くなる。 $\phi > 0$ の場合、プラズマの強い部分が一方の給電点側へ移動し、 $\phi < 0$ の場合、他方の給電点側へ移動する。

なお、ここでは、Y21(x, t)とY22(x, t)の2つの電圧波の合成波を第2の定在波Y2(x, t)と呼ぶ。

【0120】

一对の電極間の電力の強さは、電圧の合成波Y2(x, t)の振幅値の二乗に比例する。即ち、電力の強さI2(x, t)は、

$$I_2(x, t) \propto \cos^2\left\{2\pi(x - L_0 / 2) / \lambda - \phi / 2\right\}$$

と表される。このI2(x, t)を概念的に、図7に点線(第2の定在波の強さの分布)で示す。

【0121】

さて、上記の条件で製膜後、真空容器1から前記基板11を取り出して、該i型微結晶シリコン膜の膜厚み分布を評価する。

基板11に堆積されたi型微結晶シリコン膜の膜厚分布は、前記のように、VHFプラ

10

20

30

40

50

ズマ固有の現象である定在波の発生により、正弦的な分布となる。

このような、製膜試験を第2のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25bの2つの出力の位相差をパラメータに繰り返し実施する。

そして、第1及び第2の給電点20a、20bを結ぶ方向において、基板11の中央点から正弦的な膜厚分布の最大厚みの位置までの距離と、第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25bの2つの出力の位相差の関係をデータとして把握する。

例えば、図8(b)の点線の位置が基板11の中央点である場合に、中央点とそれより右側にある定在波の腹の位置との距離が $\lambda/8$ であるという条件を満たすための位相差は、例えば 2π であることが把握される。なお、 $\lambda/8 = 269\text{mm}$ である。

【0122】

上記正弦的な膜厚分布を製膜する際、第1及び第2の給電点20a、20b間の距離と、第1及び第2の給電点21a、21b間の距離が、それぞれ、波長短縮率を考慮した波長 λ の四分の一の奇数N倍、即ち、 $N \cdot \lambda/4$ の値に合致していること、及び両給電点の位置が一对の電極の端部であることから、一对の電極の両端部の一方を腹、あるいは節とする定在波が発生し易いという共鳴現象が現れる。

この共鳴現象には、上述した通り、安定したプラズマ生成が容易であることに加えて、供給電力がプラズマ生成に効果的に消費されるという作用を有することを意味している。

なお、上記の場合は、給電点の間隔が波長の二分の一の整数n倍、即ち、 $n \cdot \lambda/2$ に設定される場合に比べて、定在波の生成が容易に行える。

【0123】

(ステップ4)

前記ステップ1~3の結果を受けて、目的とするi型微結晶シリコン膜の製膜のステップに入る。先ず、図9及び図10において、予め、基板11を第2の電極4の上に設置し、図示しない真空ポンプ10を稼働させ、真空容器1内の不純物ガス等を除去した後、原料ガス供給管8からSiH₄ガスを、0.8~1.0 SLM(標準状態換算でのガス流量:L/分)、例えば0.8 SLM、水素を5.0 SLMで供給しつつ、圧力を5.0 Torr(665Pa)に維持する。基板温度は100~350の範囲、例えば220に保持する。

基板11のサイズは、長さ1.5m×幅0.25m(厚み4mm)とする。

次に、前記第1のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25aの2つの出力、即ち、周波数92MHzの正弦波の位相差をステップ2で得られたデータで把握した ϕ_1 に設定し、そのパルス変調を図5及び図6に示す第1の電力Y11(t)及び第2の電力Y12(t)におけるパルス幅Hw及び周期T0を、例えばHw=250μ秒及びT0=1m秒に設定し、第1及び第2の電力を、それぞれ250Wとして、第1の電力Y11(t)を第1及び第3の給電点20a、21aに、第2の電力Y12(t)を第2及び第4の給電点20b、21bに供給する。

そして、第2のパルス変調方式位相可変2出力の発信器25bの2つの出力、即ち周波数92MHzの正弦波の位相差を手順3で得られたデータで把握した ϕ_2 に設定し、かつ、そのパルス変調を図5及び図6に示す第3の電力Y21(t)及び第4の電力Y22(t)におけるパルス幅Hw及び周期T0を例えばHw=250μ秒及びT0=1m秒で、かつ、前記Y11(t)及びY12(t)のパルス変調のパルス立ち上がり時間より半周期、即ちT0/2遅れた時刻に立ち上がるように設定し、第3及び第4の電力を、それぞれ250Wとして、第3の電力Y21(t)を第1及び第3の給電点20a、21aに、第4の電力Y22(t)を第2及び第4の給電点20b、21bに供給する。

ここで、上記Hw、T0及びパルス変調のパルス立ち上がり時間を上記の数値から変更して製膜していくつかの製膜データを比較することができる。

【0124】

一对の電極2、4間に4つの電力が供給されると、前述のように、Y11(x,t)とY12(x,t)は干渉して第1の定在波Y1(x,t)を形成し、Y21(x,t)とY22(x,t)は干渉して第2の定在波Y2(x,t)を形成する。

ただし、 $Y_{11}(x, t)$ は、 $Y_{21}(x, t)$ 及び $Y_{22}(x, t)$ とは、時間的に分離されているので干渉しない。また、同様に、 $Y_{12}(x, t)$ は、 $Y_{21}(x, t)$ 及び $Y_{22}(x, t)$ と干渉しない。

したがって、上記パルス変調の周期 T_0 より大幅に長い数秒以上の一般的な製膜時間で考えれば、一對の電極 2、4 間に生成される電力の強さの分布は、第 1 の定在波 $Y_1(x, t)$ の強さの分布 $I_1(x, t)$ と第 2 の定在波 $Y_2(x, t)$ の強さの分布 $I_2(x, t)$ の重ね合わせた形となる。その様子を概念的に図 7 に示す。

ここで、基板の中央点を x 軸の原点とし、第 1 の給電点 20a 側から第 2 の給電点 20b の方向を正の方向とすると、第 1 の定在波 $Y_1(x, t)$ の強さの分布 $I_1(x, t)$ は、比例定数を B とすると、

$$I_1(x, t) = B \cos^2 \{ 2x / \lambda \}$$

第 2 の定在波 $Y_2(x, t)$ の強さの分布 $I_2(x, t)$ は、

$$I_2(x, t) = B \sin^2 \{ 2x / \lambda \}$$

一對の電極 2、4 間に生成される電力の強さの分布 $I(x, t)$ は、

$$\begin{aligned} I(x, t) &= B \cos^2 \{ 2x / \lambda \} + B \sin^2 \{ 2x / \lambda \} \\ &= B \end{aligned}$$

この結果は、該一對の電極 2、4 間に生成される電力の強さの分布 $I(x, t)$ は、 x 即ち電力の伝播方向の位置に依存しないで一定の値であり、均一であるということを示している。また、周波数に依存しないで、一樣になることを示している。

このことは、上記プラズマの生成方法は、定在波の影響を受けない方法、即ち定在波フリーのプラズマ生成方法であるということができる。

【0125】

SiH_4 ガスがプラズマ化されると、そのプラズマ中に存在する SiH_3 、 SiH_2 、 SiH 、 H 等のラジカルが拡散現象により拡散し、基板 11 の表面に吸着されることにより i 型微結晶シリコン膜が堆積するが、一對の電極 2、4 間の電力の分布が、上述の通り、時間平均的に一樣であるので、その堆積膜は一樣になる。

このことは、本発明の装置及び方法では、波長 λ の二分の一を越えるサイズの基板を対象にした場合においても、一樣な膜厚分布の形成が可能であることを示している。即ち、従来の VHF プラズマ表面処理装置及び方法では不可能視されている波長 λ の二分の一を越えるサイズの基板を対象にした場合でも、本発明は一樣な膜厚分布の形成が実現可能であるということの意味している。

また、第 1 及び第 2 の給電点 20a、20b 間の距離と、第 3 及び第 4 の給電点 21a、21b 間の距離が、それぞれ、波長短縮率を考慮した波長 λ の四分の一の奇数 N 倍、即ち、 $N/4$ の値に合致していること、及び両給電点の位置が一對の電極の端部であることから、一對の電極の両端部の一方を腹、あるいは節とする定在波が発生し易いという特徴がある。

即ち、このことは、安定したプラズマ生成が容易であることに加えて、供給電力がプラズマ生成に効果的に消費されるということの意味している。

なお、上記の場合は、給電点の間隔が波長の二分の一の整数 n 倍、即ち、 $n/2$ に設定される場合に比べて、定在波の生成が容易に行える。

したがって、上記のことは VHF プラズマ CVD 装置の応用分野においては画期的な発見であり、その実用価値は著しく大きいものがある。

【0126】

上記ステップ 4 において製膜される i 型微結晶シリコン膜の製膜速度は、供給電力密度 2.02 kW/m^2 ($1 \text{ kW}/0.495 \text{ m}^2$) において、 $2.5 \sim 3.0 \text{ nm/s}$ 程度が得られる。

また、供給電力密度 3.23 kW/m^2 ($1.6 \text{ kW}/0.495 \text{ m}^2$) においては、 $3 \sim 3.5 \text{ nm/s}$ 程度が得られる。

上記製膜速度 $2.5 \sim 3.0 \text{ nm/s}$ に対する供給電力密度 2.02 kW/m^2 ($1 \text{ K$

10

20

30

40

50

W / 0 . 4 9 5 m²)、及び上記製膜速度 3 ~ 3 . 5 n m / s 程度に対する供給電力密度 3 . 2 3 K W / m² (1 . 6 K W / 0 . 4 9 5 m²) は、それぞれ、従来技術での供給電力密度に比べて小さい数値になっている。

このことは、上述した共鳴現象の作用により、一対の電極への電力を供給する際の電力損失を抑制した電力供給が実現されていることを意味している。

【 0 1 2 7 】

本発明の第 2 の実施形態では、第 1 の電極サイズ 1 . 6 m × 0 . 3 m (厚み、 2 0 m m)、第 2 の電極サイズ 1 . 6 5 m × 0 . 4 m (厚み 1 5 0 m m) であるので、基板サイズは上記 1 . 5 m × 0 . 2 5 m × 厚み 4 m m 程度に制約されるが、第 1 の電極 2 の個数を増加し、第 2 の電極サイズを増大し、且つ、第 1 の電極 2 の個数と同じ台数の電力供給装置 (図 9 図示の電力供給系) を設置すれば、基板サイズの幅は拡大可能であることは当然のことである。

10

【 0 1 2 8 】

また、集積化タンデム型太陽電池の製造では、膜厚分布として ± 1 0 % 以内であれば性能上問題はない。上記実施例によれば、9 2 M H z の電源周波数を用いても、従来技術では不可能であった該一対の電極 2、4 間の電力の強さの分布 I (x、t) の均一化が可能である。即ち、膜厚分布として ± 1 0 % 以内を実現可能である。

しかも、供給された電力が一対の電極間以外に漏れないで、該一対の電極間でのプラズマ生成に消費されるので、電力損失が従来技術に比べて著しく小さい。

このことは、薄膜シリコン太陽電池、薄膜トランジスタおよび感光ドラム等の製造分野での生産性向上および低コスト化に係わる工業的価値が著しく大きいことを意味している。

20

【 0 1 2 9 】

(実施例 3)

次に、本発明の第 3 の実施形態に係わるプラズマ C V D 装置及びプラズマ C V D 法を図 1 0 及び図 1 3 を参照して説明する。

本発明の第 3 の実施形態に係わるプラズマ C V D 装置及びプラズマ C V D 法では、本発明の第 2 の実施形態に係わるプラズマ C V D 装置及びプラズマ C V D 法において用いられた図 1 1 図示の 2 本の同軸ケーブルからなる平衡伝送線路を用いた電極への給電手段に代えて、図 1 3 に示される 2 枚の平行平板を用いる平衡伝送線路を用いる。

30

図 1 3 において、符番 4 0 0 は、2 枚の平行平板を用いた平衡伝送線路である。該平衡伝送線路は、管状導体 6 0 と、フランジ 6 5 と、第 1 の長方形板状導体 6 1 と、第 2 の長方形板状導体 6 2 と、第 1 の誘電体 6 3 と、第 2 の誘電体 6 4 とで構成される。第 1 及び第 2 の誘電体 6 3、6 3 としては、酸化ケイ素 S i O₂ (比誘電率 = 約 4)、窒化ケイ素 S i N₄ (比誘電率 = 約 7) 及びアルミナ A l₂O₃ (比誘電率 = 約 8 . 5 ~ 1 1) などのセラミックスから選ぶ。ここでは、例えば、比誘電率 1 0 のアルミナとする。

なお、管状導体 6 0 の一方の端部には、真空容器 1 との接合に用いられるフランジ 6 5 が固着されている。また、第 1 及び第 2 の長方形板状導体 6 1、6 2 の一方の端部には、第 1 及び第 2 の電極 2、4 との接続に用いられる接続端子 6 1 a、6 2 a が固着されている。

40

平衡不平衡変換装置の 2 つの出力と該平衡伝送線路 4 0 0 との接続には、第 1 及び第 2 の長方形板状導体 6 1、6 2 の端部が用いられる。

【 0 1 3 0 】

本発明の第 3 の実施形態に係わるプラズマ C V D 装置及びプラズマ C V D 法では、図 1 0 に示される装置構成において、第 1 の L C ブリッジ型平衡不平衡変換装置 4 0 a と第 1 及び第 3 の給電点 2 0 a、2 1 a の間に平衡伝送線路 4 0 0 を設置し、かつ、該平衡伝送線路 4 0 0 を用いて、第 2 の L C ブリッジ型平衡不平衡変換装置 4 0 a の 2 つの出力を、それぞれ第 1 及び第 3 の給電点 2 0 a、2 1 a に接続する。

また、図 1 0 に示される装置構成において、第 1 の L C ブリッジ型平衡不平衡変換装置 4 0 b と第 2 及び第 4 の給電点 2 0 b、2 1 b の間に平衡伝送線路 4 0 0 を設置し、かつ

50

、該平衡伝送線路 4 0 0 を用いて、第 2 の LCブリッジ型平衡不平衡変換装置 4 0 b の 2 つの出力を、それぞれ第 2 及び第 4 の給電点 2 0 b、2 1 b に接続する。

【 0 1 3 1 】

そして、本発明の第 2 の実施形態に係わるプラズマ C V D 装置及びプラズマ C V D 法において説明したステップ 1、ステップ 2、ステップ 3 及びステップ 4 と同じ要領で、プラズマの生成及び製膜を行う。

その詳細の説明は省略するが、得られる結果は、本発明の第 2 の実施形態に係わるプラズマ C V D 装置及びプラズマ C V D 法の場合と同様である。

【図面の簡単な説明】

【 0 1 3 2 】

【図 1】図 1 は本発明の第 1 の実施形態に係わるプラズマ C V D 装置の全体を示す概略図。

【図 2】図 2 は図 1 図示のプラズマ C V D 装置内部の一对の電極への電力供給部の構造を示す説明図。

【図 3】図 3 は図 1 図示のプラズマ C V D 装置内部の一对の電極へ給電された電力の伝播の概念図。

【図 4】図 4 は図 1 図示のプラズマ C V D 装置を用いた i 型微結晶シリコン膜の製膜で行う電力供給の際の電力伝送の調整方法の例を示す説明図。

【図 5】図 5 は図 1 図示の第 1 及び第 2 のパルス変調方式位相可変 2 出力発信器から出力されるパルス変調された出力の典型例を示す説明図。

【図 6】図 6 は図 1 図示の第 1 及び第 2 のパルス変調方式位相可変 2 出力発信器から出力されるパルス変調された正弦波信号の典型例を示す説明図。

【図 7】図 7 は図 1 図示のプラズマ C V D 装置における一对の電極間に発生する 2 つの定在波の強さを示す説明図。

【図 8】図 8 は図 1 図示のプラズマ C V D 装置を用いた製膜条件の調整の際に得られる i 型微結晶シリコン膜の膜厚分布の第 1 の典型例の説明図。

【図 9】図 9 は図 1 図示のプラズマ C V D 装置を用いた製膜条件の調整の際に得られる i 型微結晶シリコン膜の膜厚分布の第 2 の典型例の説明図。

【図 1 0】図 1 0 は本発明の第 2 の実施形態に係わるプラズマ C V D 装置の全体を示す概略図。

【図 1 1】図 1 1 は平衡不平衡変換装置と 2 本の同軸ケーブルを組み合わせた平衡伝送回路を用いた電極への電力供給手段の詳細を示す説明図。

【図 1 2】図 1 2 は、図 1 1 図示の平衡伝送回路を用いた電極への電力供給手段での高周波電流の流れの概念を示す説明図。

【図 1 3】図 1 3 は 2 枚の平行平板からなる平衡伝送回路の一例を示す説明図。

【図 1 4】図 1 4 は同軸ケーブルの芯線と外部導体を用いて一对の電極へ電力を供給する際に発生する漏洩電流を示す説明図。

【図 1 5】図 1 5 は平衡不平衡変換装置と 2 本の同軸ケーブルより構成される平衡伝送路を用いた電力の平衡伝送装置の概念図。

【符号の説明】

【 0 1 3 3 】

- 1 . . . 真空容器、
- 2 . . . 第 1 の電極、
- 3 . . . 図示しない基板ヒータ、
- 4 . . . 第 2 の電極、
- 5 . . . 絶縁物支持材、
- 6 . . . ガス混合箱、
- 7 . . . 整流孔、
- 8 . . . 原料ガス供給管、
- 9 a、9 b . . . 排気管、

10

20

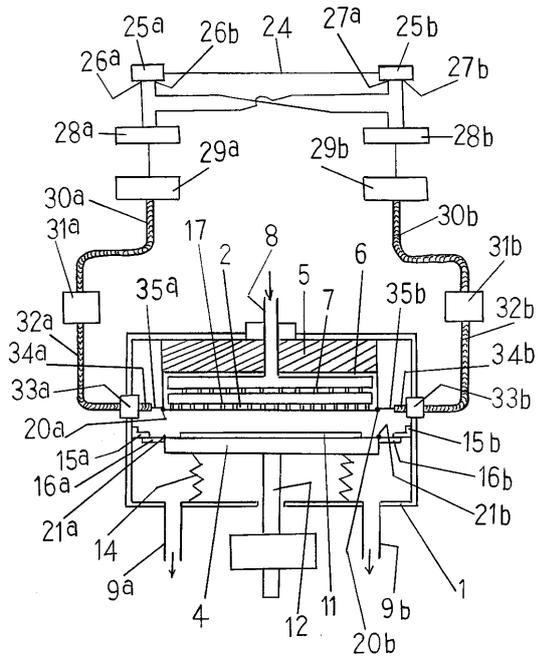
30

40

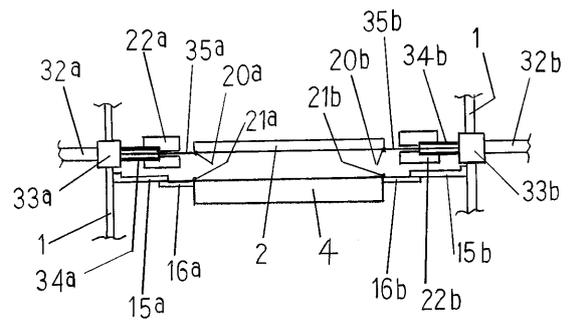
50

10 . . . 図示しない真空ポンプ、	
11 . . . 基板、	
12 . . . 基板リフター、	
13 . . . 図示しないゲートバルブ、	
14 . . . ベローズ、	
15 a、15 b . . . 第1及び第2の接続導体、	
16 a、16 b . . . 第3及び第4の接続導体、	
17 . . . ガスシャワー孔、	
20 a、20 b . . . 第1及び第2の給電点、	
21 a、21 b . . . 第3及び第4の給電点、	10
22 a、22 b . . . 第1及び第2の絶縁キャップ、	
24 . . . 同期信号伝送ケーブル、	
25 a、25 b . . . 第1及び第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器、	
26 a、26 b . . . 第1のパルス変調方式位相可変2出力発信器の第1及び第2の出力端子、	
27 a、27 b . . . 第2のパルス変調方式位相可変2出力発信器の第1及び第2の出力端子、	
28 a、28 b . . . 第1及び第2の結合器、	
29 a、29 b . . . 第1及び第2の電力増幅器、	
30 a、30 b . . . 第1及び第2の同軸ケーブル、	20
31 a、31 b . . . 第1及び第2の整合器、	
32 a、32 b . . . 第1及び第2の同軸ケーブル、	
33 a、33 b . . . 第1及び第2の電流導入端子、	
34 a、34 b . . . 第3及び第4の同軸ケーブル、	
35 a、35 b . . . 芯線、	
40 a、40 b . . . 第1及び第2のLCブリッジ型平衡不平衡返還装置、	
41 a、41 b . . . 第5及び第6の同軸ケーブル、	
42 . . . 第3の電流導入端子、	
43 a、43 b . . . 第7及び第8の同軸ケーブル、	
43 a、43 b . . . 芯線、	30
46 a、46 b . . . 第9及び第10の同軸ケーブル、	
47 . . . 第4の電流導入端子、	
48 a、48 b . . . 第11及び第12の同軸ケーブル、	
49 a、49 b . . . 芯線、	
53 a、53 b . . . 第1及び第2の外部導体接続金具。	

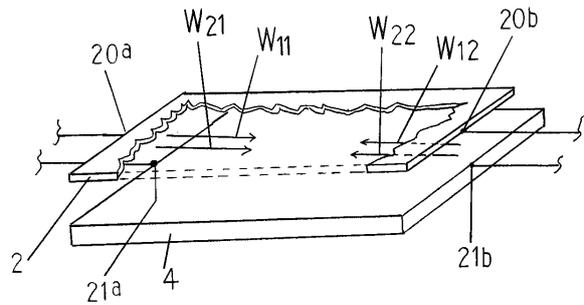
【図1】



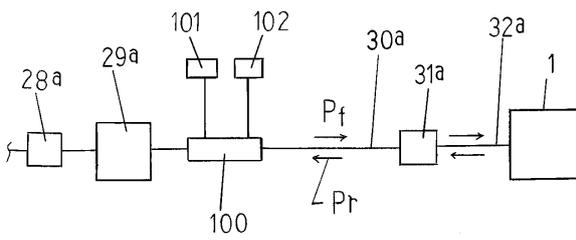
【図2】



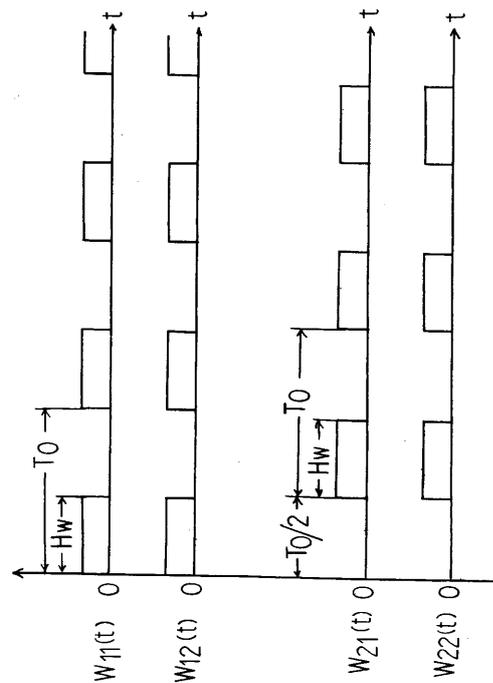
【図3】



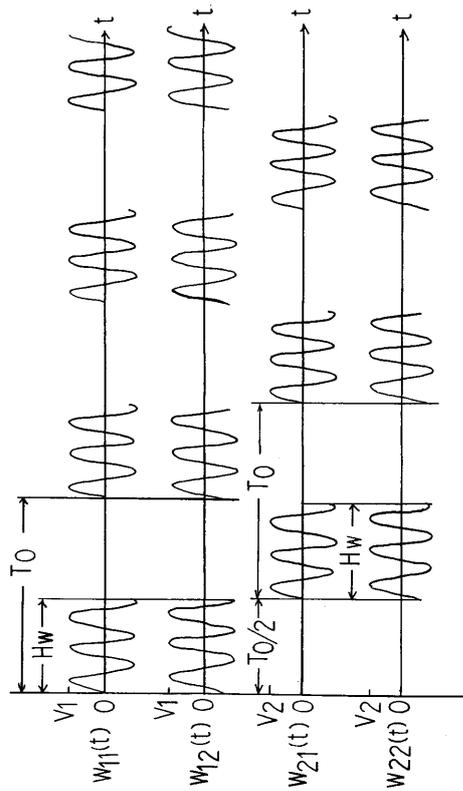
【図4】



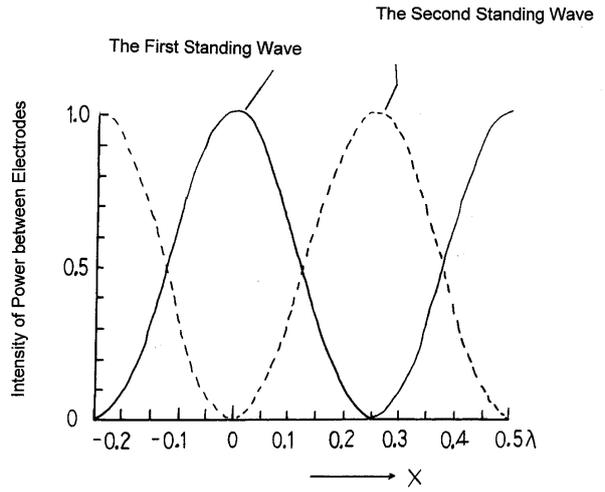
【図5】



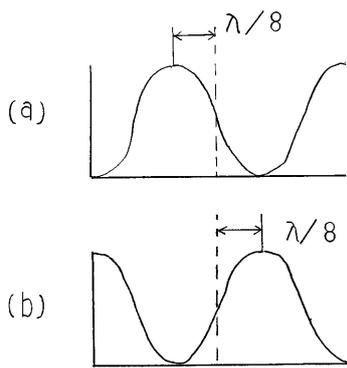
【 図 6 】



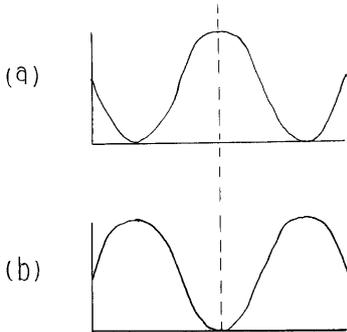
【 図 7 】



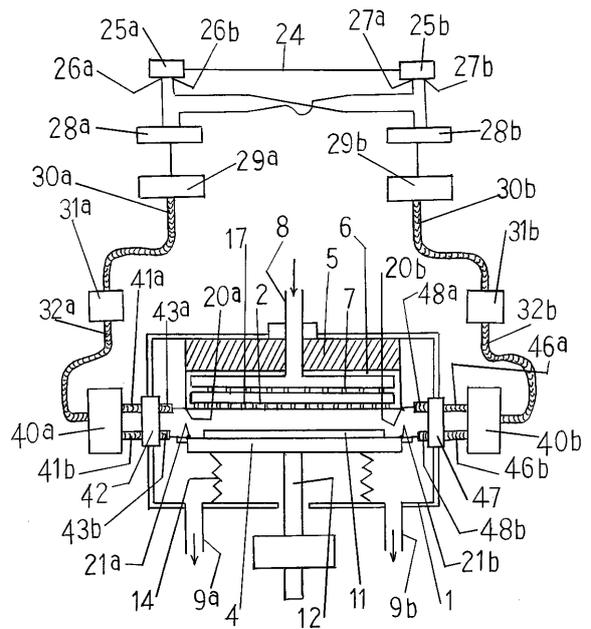
【 図 8 】



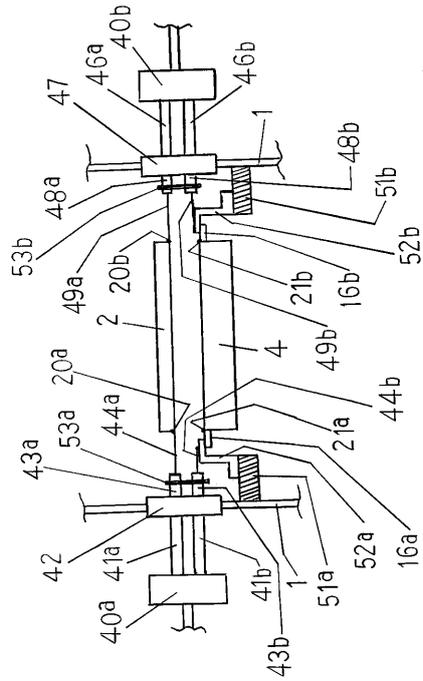
【 図 9 】



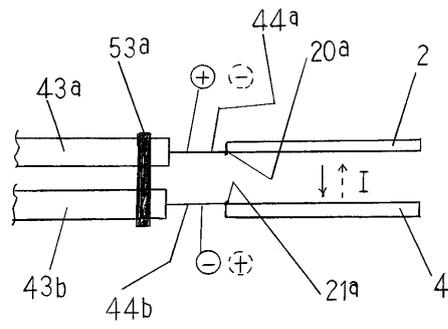
【 図 10 】



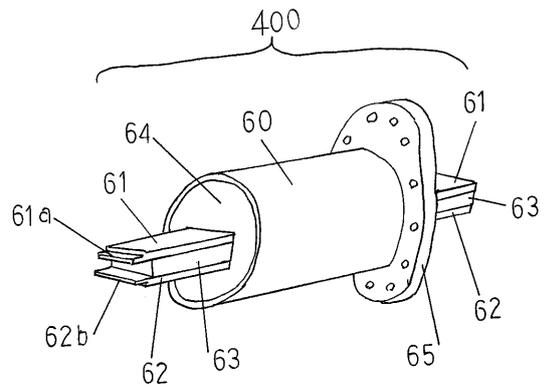
【 図 1 1 】



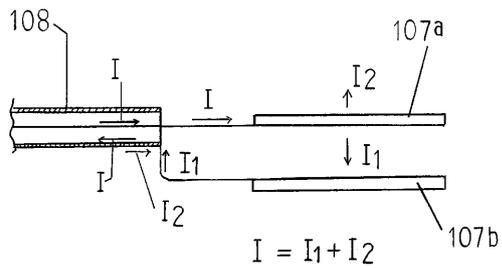
【 図 1 2 】



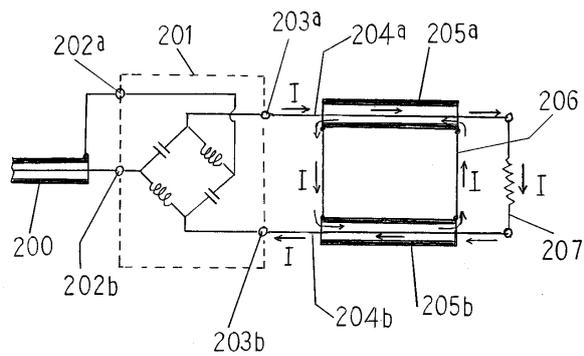
【 図 1 3 】



【 図 1 4 】



【 図 1 5 】



フロントページの続き

(58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)

H 0 1 L	2 1 / 2 0 5
H 0 1 L	2 1 / 3 1
H 0 1 L	2 1 / 3 0 6 5
C 2 3 C	1 6 / 0 0 - 1 6 / 5 6
H 0 5 H	1 / 4 6