

シリコン系薄膜形成のためのプラズマCVD装置の 原理、特徴及び設計・製作における留意事項

1. グロー放電プラズマの基礎事項
2. プラズマCVD(製膜)の基礎事項
3. 微結晶Si製膜を実現する2つの方法(装置)
4. プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項
5. 高周波電力供給手段の留意事項

令和4年8月7日

APT代表

村田正義

プラズマCVD装置の特徴(長所)

装置の構成が
単純

反応容器、電極、高周波電源、
ガス供給・排気装置

用途が広い。

液晶ディスプレイ用TFT、
太陽電池の発電膜、ハー
ドコーティング膜等

グロー放電
プラズマを活用

プラズマ発生が
容易に可能

電極に高周波電力を供給

- ・電源周波数13.56MHz
- ・VHF帯域
(30MHz~300MHz)

製膜の種類が豊富

アモルファスシリコン膜(a-Si:H)、
微結晶シリコン膜(μ c-Si:H)、
窒化シリコン膜(SiN_x膜)、カーボン系
膜等

プラズマCVDの特徴(短所)

プラズマの強さ分布 の制御が困難

(電極内部の電界が不均一化)

電源周波数がVHF帯域
(30MHz~300MHz)になれば、
不均一度が増大

原料ガスの流れ分布 の制御が困難

- ・ガス供給が不均一
- ・ガス排気流が不均一

大面積基板へ の応用が困難

- ・約1m×1m以上の
基板への応用



膜質・膜厚
の均一化が困難

プラズマ特性の制御 が困難

- ・プラズマ密度の空間分
布、電子温度の空間分布
の制御が困難
- ・プラズマ電位の低減化
が困難

プラズマ化学反応の 制御が困難 (不均一化)

- ・SiH₃ラジカル、Hラジカル
発生濃度制御が困難化

シリコン系薄膜形成のための プラズマCVD装置の問題点の所在

一対の電極に、
シランガス原料を導入し、

SiH₄ガスを
プラズマ化

SiH₃ラジカル
SiH₂ラジカル
Hラジカル、
各種イオン等が
発生

SiH₃ラジカルを
前駆体として基板
上に膜を形成。

SiH₂ラジカルは
反応速度が速く、
且つ、気相中で粉
を発生する。膜中
に混入する。
粗悪膜形成の
主役である。

1. グロー放電プラズマの基礎事項

- プラズマ中の電子の発生機構 / α 作用、 β 作用、 γ 作用
- Paschenの法則
- プラズマパラメータ
- 電子のエネルギー分布
- 基板に与えるプラズマダメージ
- プラズマは、誘電体である

グロー放電プラズマの発生条件及び特徴(プラズマの発生)

プラズマとは

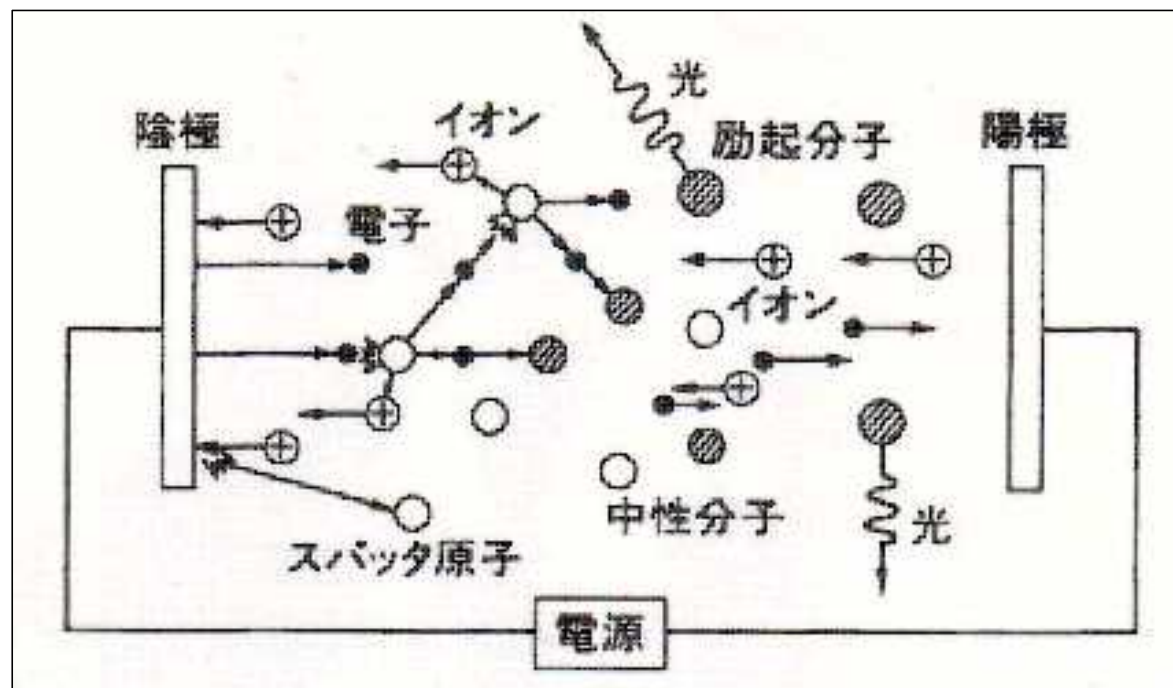
- ・気体がイオンと電子に分離された状態(電離した気体)
- ・自由に動き得る電子とイオンの数が十分に沢山存在し、その正負の電荷がバランスして、巨視的には電荷の総和がゼロの状態にある

【 plasmaの語義】

1927年、ラングミュア(L.Langmuir, 米国)によって導入された to mold、
または、a thing molded を意味する
ギリシャ語 plasso に由来とのこと

電極間に

強い電界を形成すると、プラズマが発生



グロー放電プラズマの発生条件及びその特徴(α作用、β作用、γ作用)

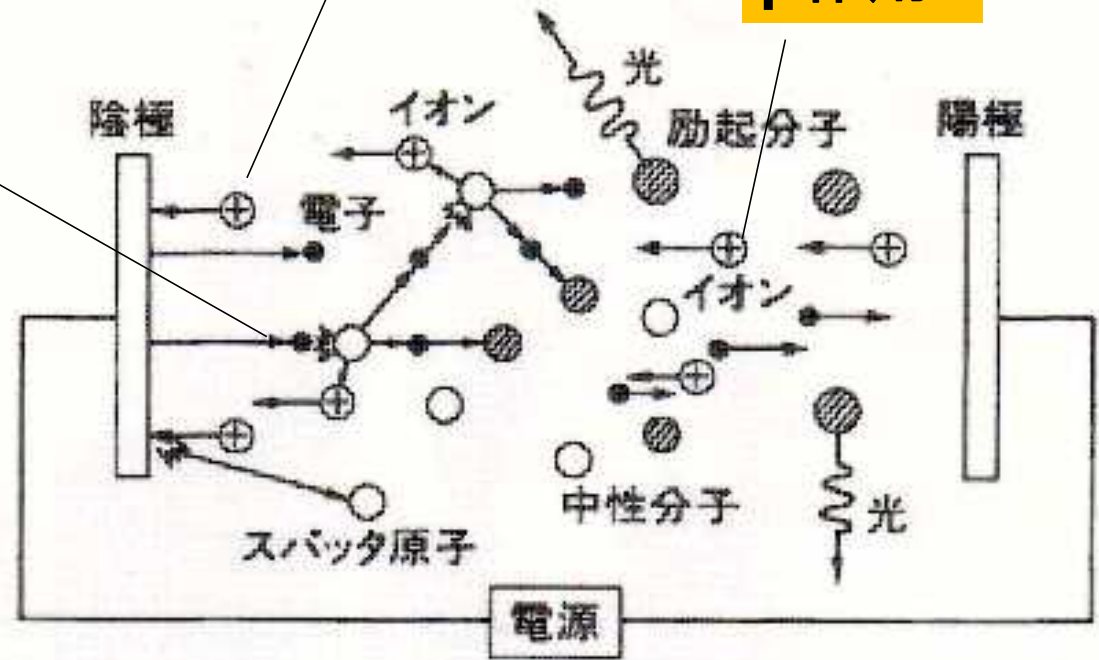
プラズマ中の電子発生に関する基本的現象

- ・ α作用 = 電子が気体分子に衝突して電離させる作用
- ・ β作用 = 正イオンが気体分子に衝突して電離させる作用
- ・ γ作用 = 正イオンが陰極に衝突して電子を放出させる作用

α作用

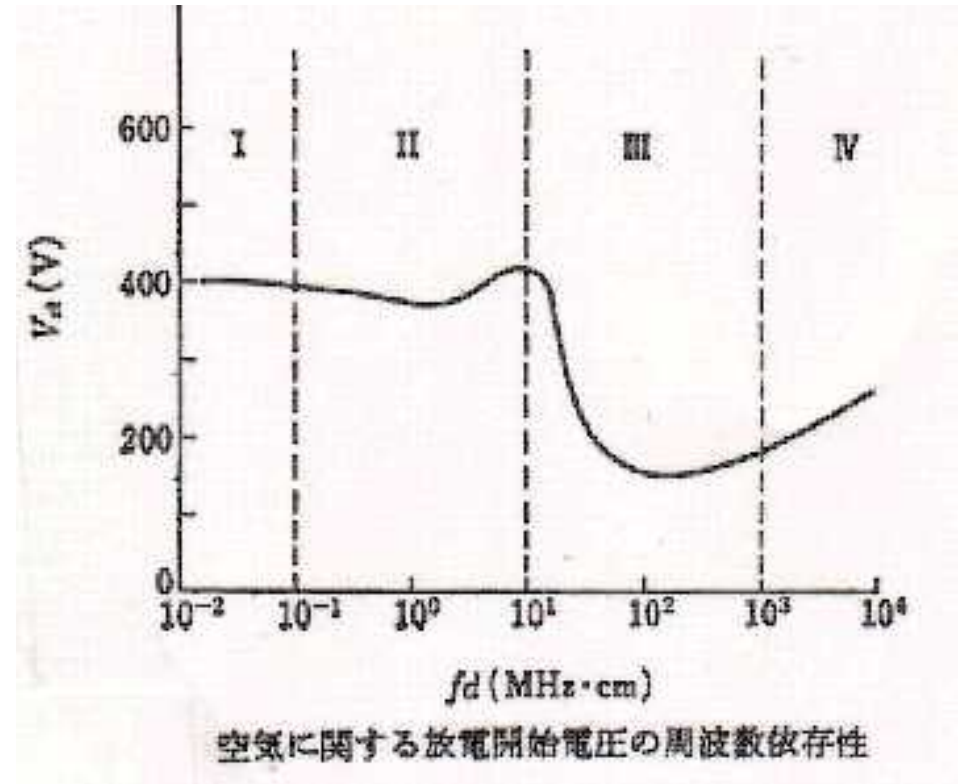
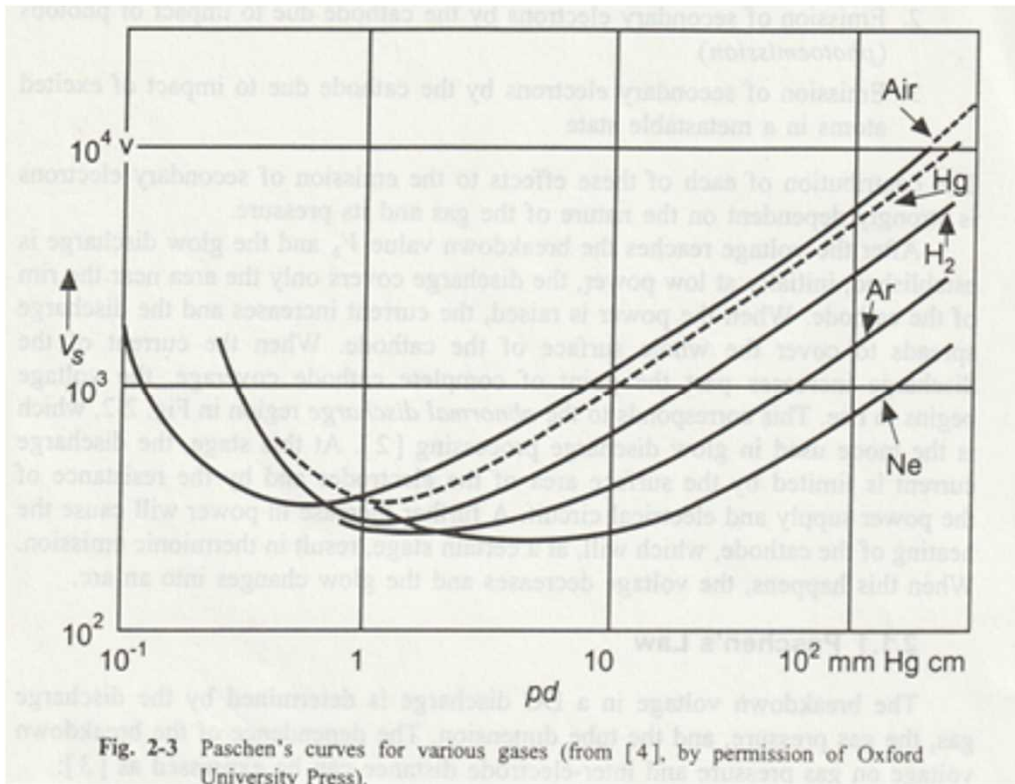
γ作用

β作用



グロー放電プラズマの発生条件及びその特徴 (Paschenの法則)

プラズマの発生条件 (Paschenの法則) : 例えば、水素プラズマでは $pd = 1 \text{ (mmHg}\cdot\text{cm)} = 1 \text{ (Torr}\cdot\text{cm)}$
・プラズマ発生時の電圧 V は、圧力 p と電極間隔 d の積 pd 、及び圧力 p と周波数 f の積 pf に強く依存する。



グロー放電プラズマの発生条件及びその特徴(プラズマパラメータ)

プラズマパラメータ(プラズマの特性)

・プラズマCVDによる製膜では、プラズマ密度 N 、正イオン密度 N_i^+ 、負イオン密度 N_i^- 、電子密度 N_e 、電子温度 T_e 、イオン温度 T_i 、プラズマ電位 V_p 及びデバイ長 λ_D 等がある。

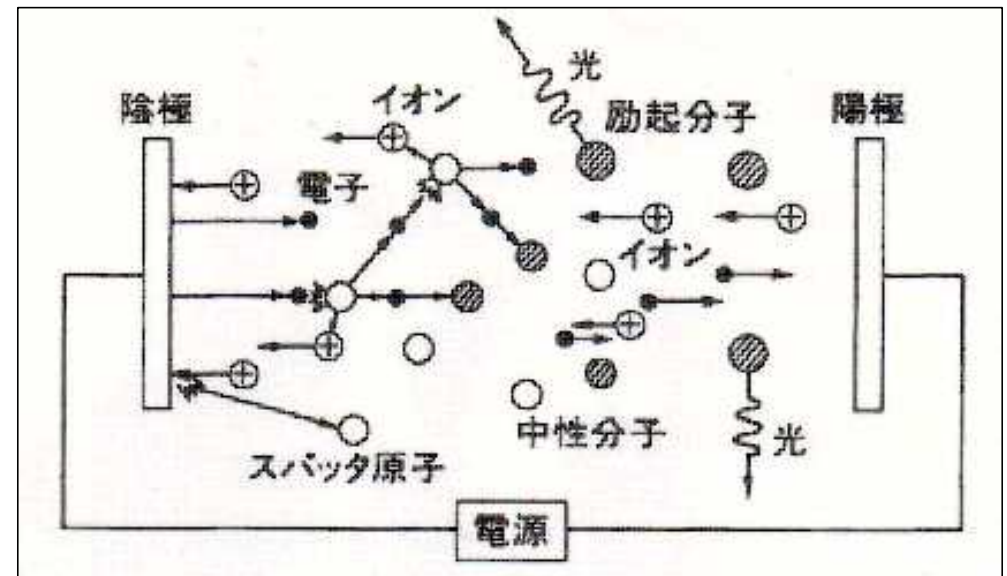
プラズマパラメータの相互の関係を、以下に示す。

$$N = N_i^+ + N_i^- + N_e$$

$$T_e \propto E \text{ (電界)} / p \text{ (圧力)}$$

$$\lambda_D \propto (T_e / N)^{1/2}$$

シースの厚みは、デバイ長 λ_D の数倍程度である



グロー放電プラズマの発生条件及びその特徴(電子のエネルギー分布)

プラズマの電子エネルギー分布(単位eV)

平均的な値(ピーク値)から、それより高い値が存在することが特徴である

裾野を持っている



ガスの種類により、該分布は異なる

グロー放電プラズマ(CVD, エッチングへの応用)は、一般的に、マックスウエル分布を用いて議論される

広島大学: 広瀬全孝教授の論文から抜粋

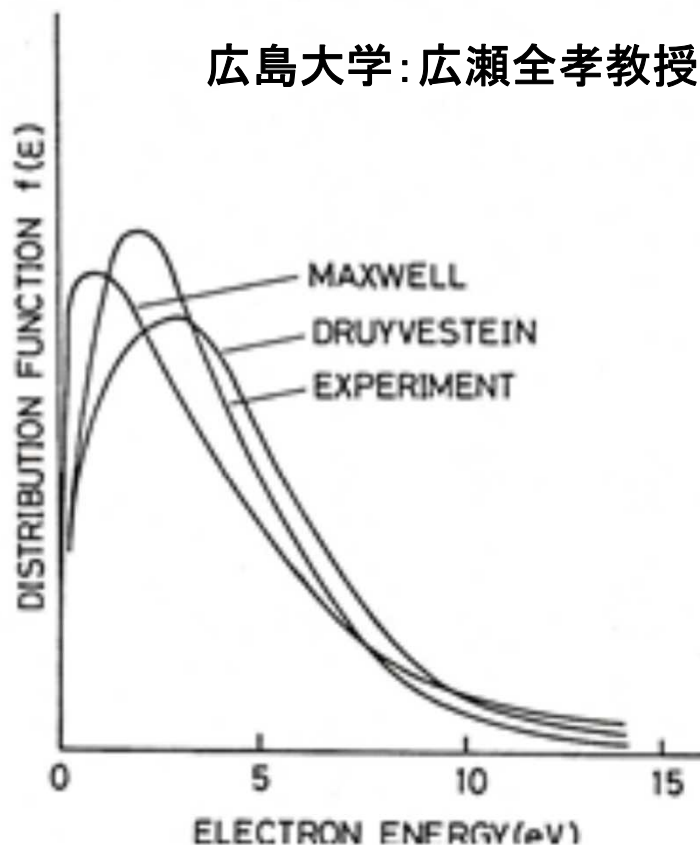
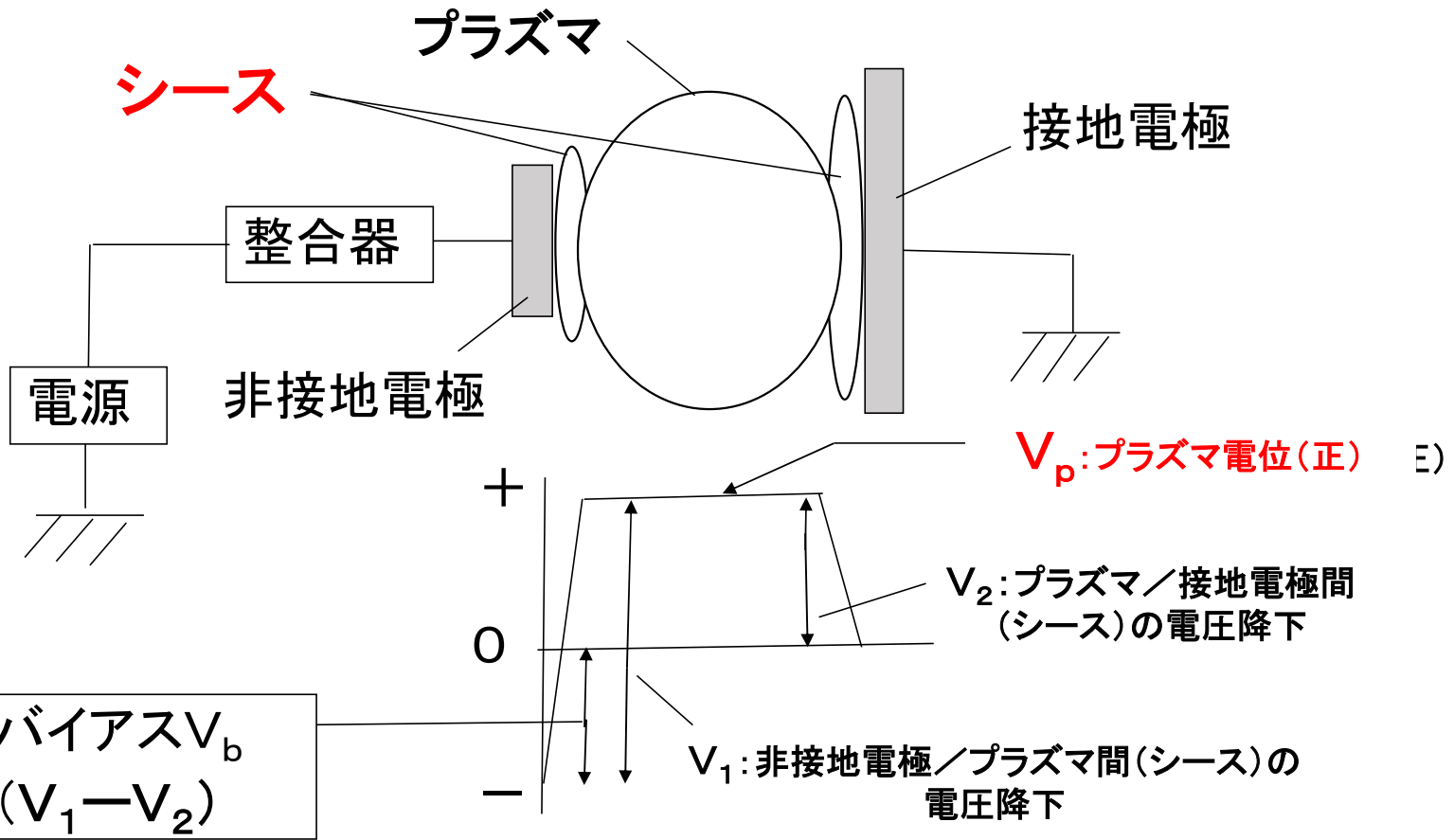


FIG. 3. An electron energy distribution function for the silane plasma obtained by the electric probe technique. (From Kocian, 1980.)

プラズマは
シースにより
囲まれる

プラズマは
正電位を保つ
(ほぼ、一様
な値)



平行平板電極 (容量結合型) プラズマの電位分布及びシースの概念

グロー放電プラズマの発生条件及びその特徴(基板に与えるプラズマダメージ)

プラズマCVDによる膜形成において、

プラズマダメージは有害である。

ダメージ抑制(プラズマ電位を低下)対策は重要な課題である

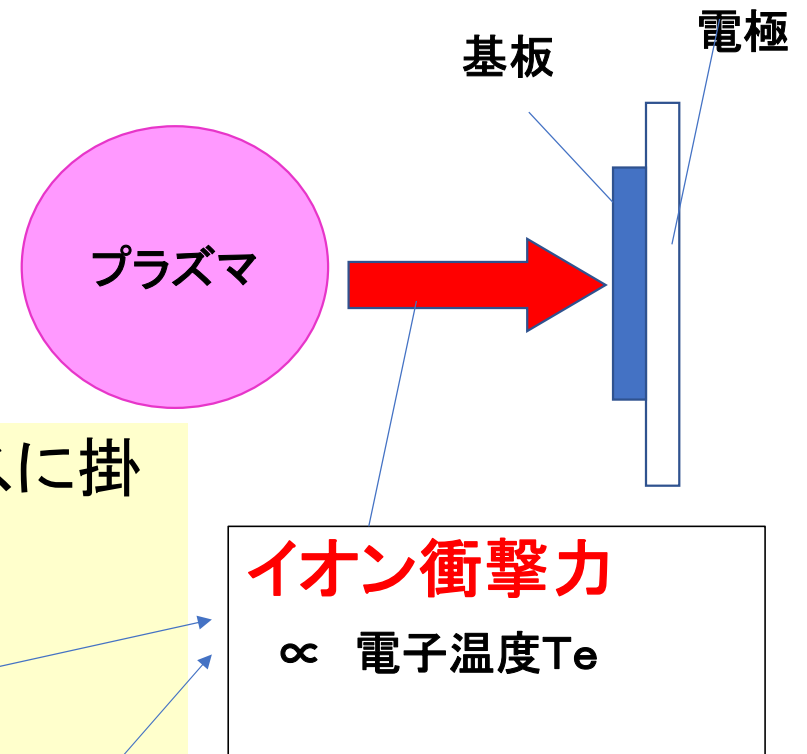
プラズマダメージは、**電子温度 T_e** 及びシースに掛かる**電位差 V_{sh}** に依存する

$$J_{plasma} = J_i + J_e$$

$$J_i = 0.61 e N_e (e T_e / M)^{1/2}$$

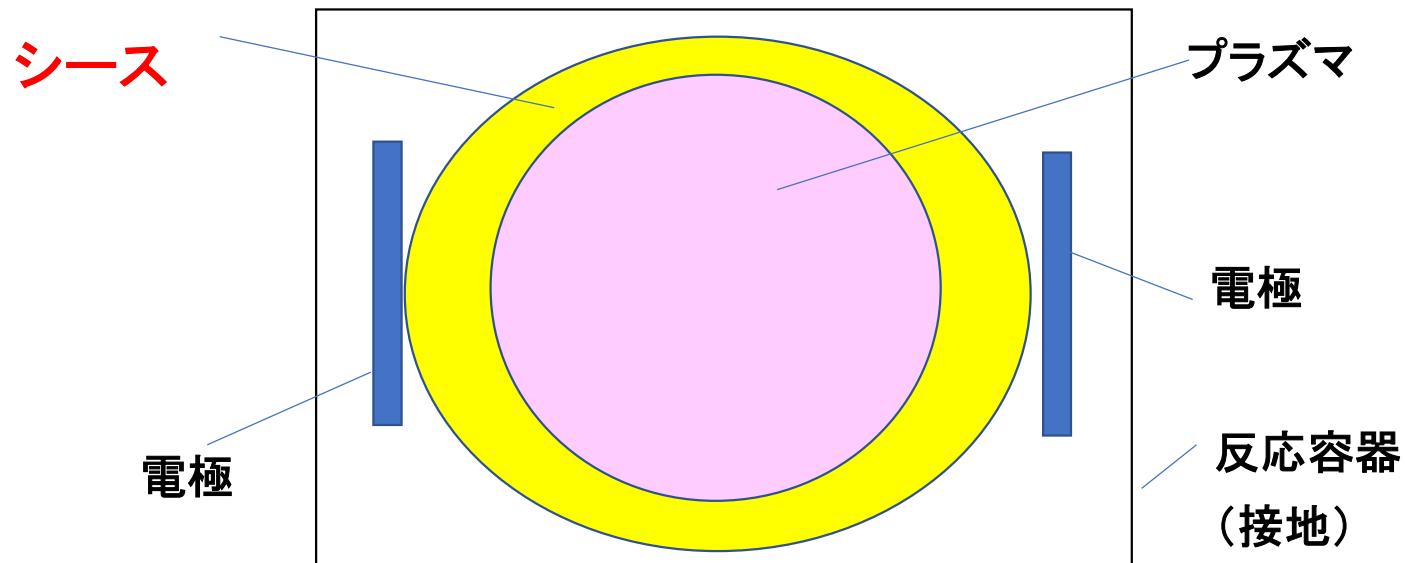
$$J_e = 0.25 (8 e T_e / \pi m) \exp(V_{sh} / T_e)^{1/2}$$

ただし、 e は電荷素量、 M はイオンの質量、 m は電子の質量である。



グロー放電プラズマの特徴(プラズマは誘電体)

- ・プラズマは、シースで囲まれている(消滅しないように、その特性を自己防御)。
- プラズマは、その生成・維持のため、電子の数・イオンの数・シースの厚み等を、自分の都合で決定する。
- プラズマは、導電性(電子とイオンの集合体)である。誘電体である。



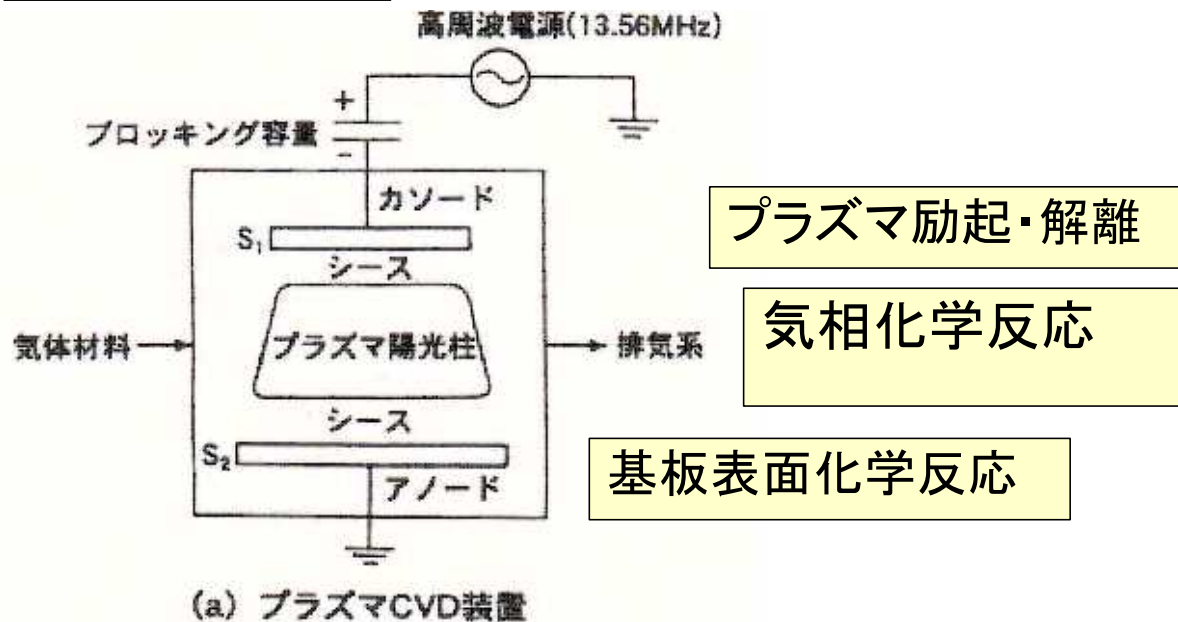
2. プラズマCVD(製膜)の基礎事項 Chemical Vapor Deposition

- ・H₂分子の励起、解離
- ・SiH₄分子の励起、解離
- ・プラズマ中の電子のエネルギー分布には、広がりが有る
- ・プラズマによるa-Si:H膜の形成(実験的研究の一例)
- ・プラズマによる微結晶Si:H膜の形成(実験的研究の一例)
- ・プラズマによる微結晶Si:H膜の形成(特許文献事例)
- ・微結晶Siの高速製膜に関する代表的文献(産総研)
- ・微結晶Siの高速製膜に関する代表的特許文献(三菱重工)

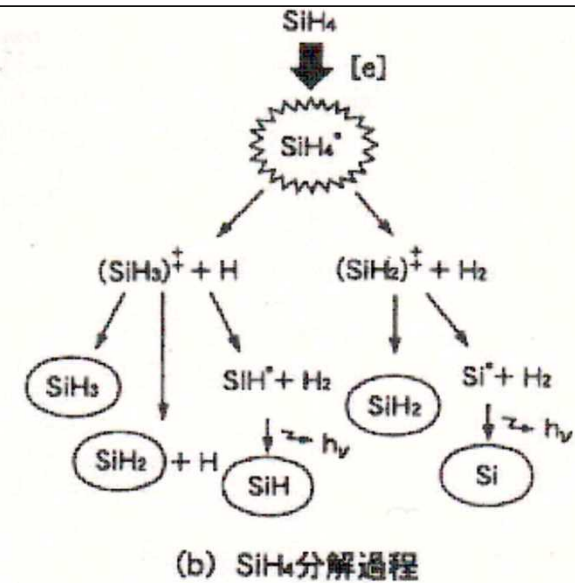
プラズマCVDの原理

- ・プラズマ中の電子・イオン・光が、ガス分子を励起あるいは分解し、ラジカル種・励起種等を発生する。
- ・ラジカル種、励起種等は気相中及び基板の表面で化学反応を起こす。
- ・基板表面に膜を形成する。

装置の構成



電子衝突によるシランガスの分解



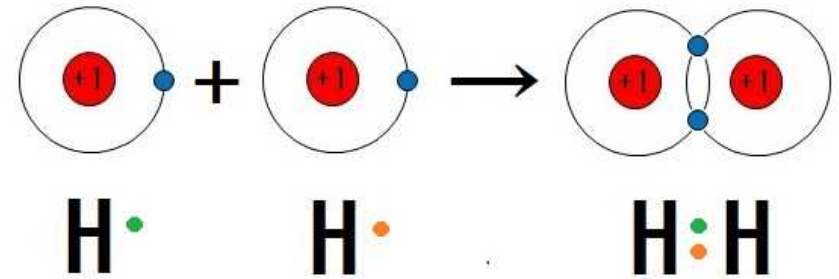
プラズマCVDによるa-Si:H膜の形成(水素分子の解離)

プラズマが電子温度 8.8 eV 以上の電子を有する場合、その電子が H_2 分子と衝突し、 H 、 H という活性種 (化学的に活性) を生成する。



電氣的には、中性

電子を1つもつ水素原子は
電子を1つ受け取り、2つになると安定する



それぞれが電子1つずつ出し合って結合すると
どちらの水素原子にとっても電子が2つの状態になる

プラズマによるH2分子の解離

H2分子の場合には

電子のエネルギーが0.01~0.1eVになると回転運動のエネルギー準位における励起が起こる.

0.52eVを超すと振動運動のエネルギー準位における励起を起こし, 約4eVで衝突断面積が最大になる.

電子エネルギーが8.8eVを超えると、H2分子は解離を始めてHとなる.

その衝突断面積は約16eVに最大値をもつ.

【出典】 佐藤照幸(名古屋大学プラズマ科学センター)、プラズマ生成の基礎、プラズマ・核融合学会誌 第69巻第2号 1993年2月、102-110

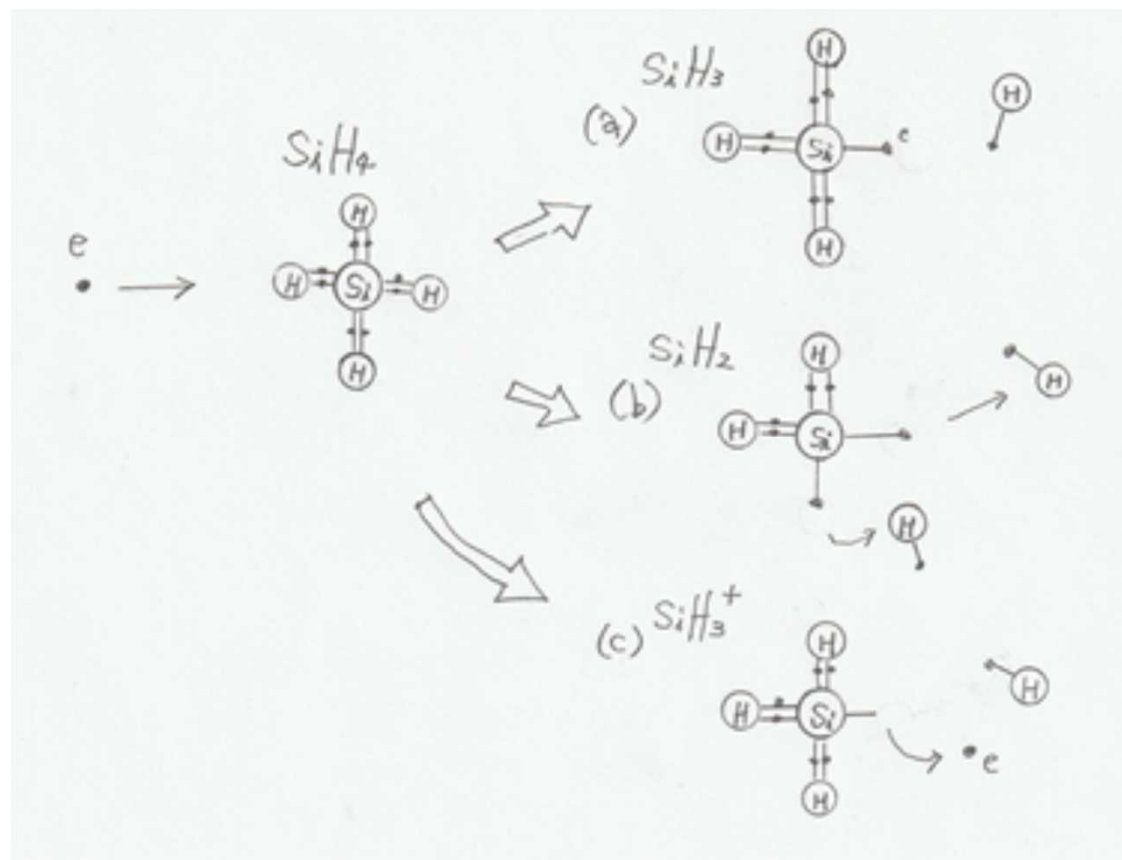
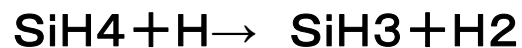
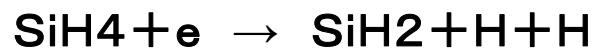
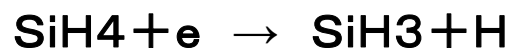
プラズマによるa-Si:H膜の形成(長寿命のSiH3ラジカル)

プラズマが電子温度8.75 eV以上の電子を有する場合、

その電子が SiH_4 分子と衝突し、 SiH_3 という活性種(化学的に活性)を生成する。

プラズマが電子温度9.47 eV以上の電子を持つ場合、

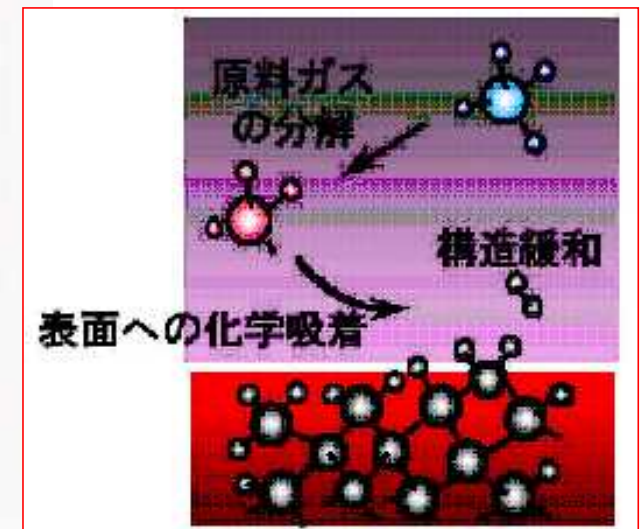
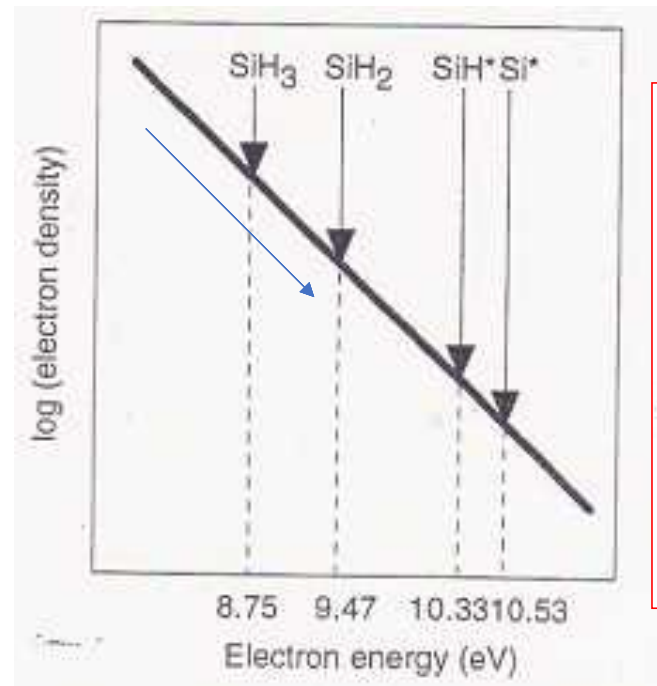
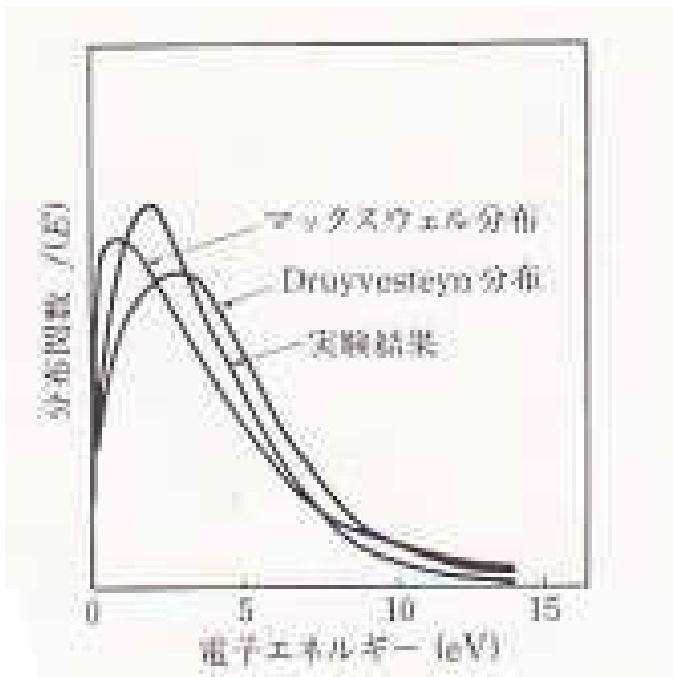
その電子が SiH_4 分子と衝突し、 SiH_2 、 SiH 、 H という活性種(化学的に活性)を生成する。



SiH₃:電気的には、中性

プラズマ特性の制御の重要性

プラズマ中の電子のエネルギー分布の制御・・・プラズマ中の**電子のエネルギー分布には、拡がり**があるので、所定の活性種を発生することが困難であるが、その制御は極めて重要



(出典) 松田彰久: プラズマ・核融合学会、第13回専門講習会「プラズマプロセッシングの基礎と応用」(2001)115-132

RF平板型電極によるa-Si:H製膜／実験研究の代表例

(J.C.Knights 、JJAP,Vol.18、1979、Suppl.18-1、101~108)

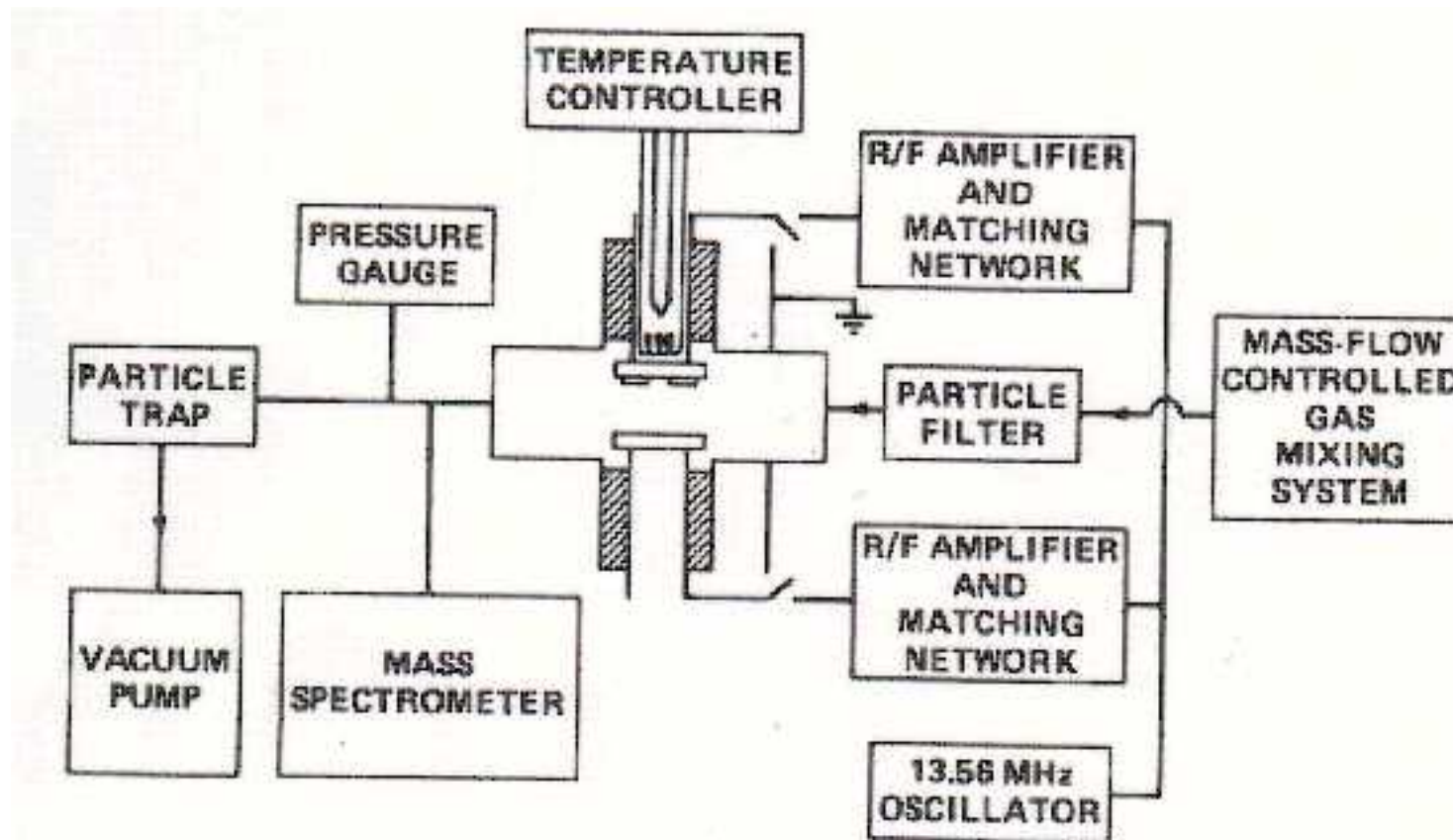


Fig. 1. Schematic of plasma-deposition system.

RF平板型電極によるa-Si:H製膜(製膜速度のパワー密度依存性)

(JJAP, Vol. 18, 1979, Suppl. 18-1, 101~108: J.C. Knights)

縦軸
製膜速度

横軸
RF電力

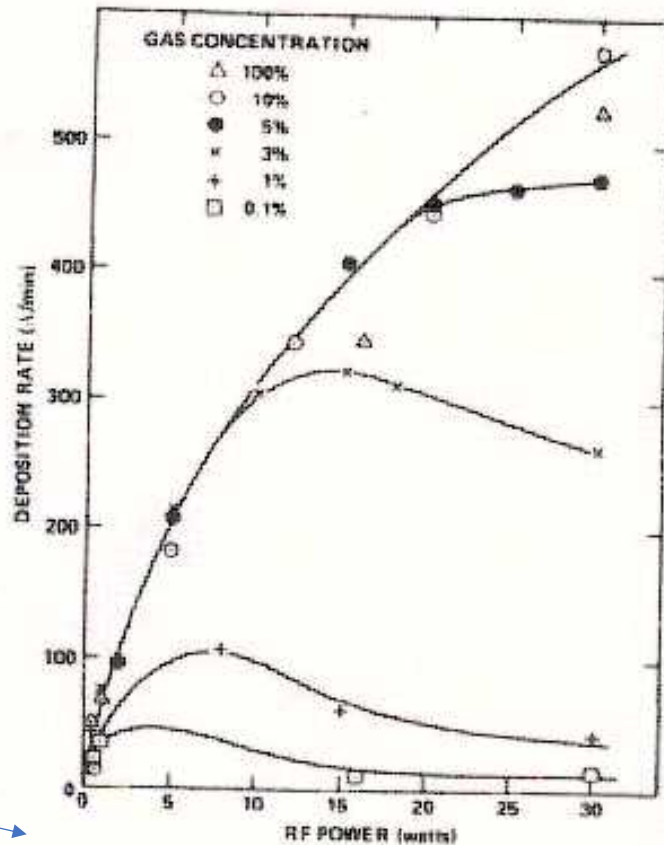


Fig. 8. Growth rate of a-Si:H at $T_s=230^\circ\text{C}$ as a function of RF power and SiH_4 concentration.

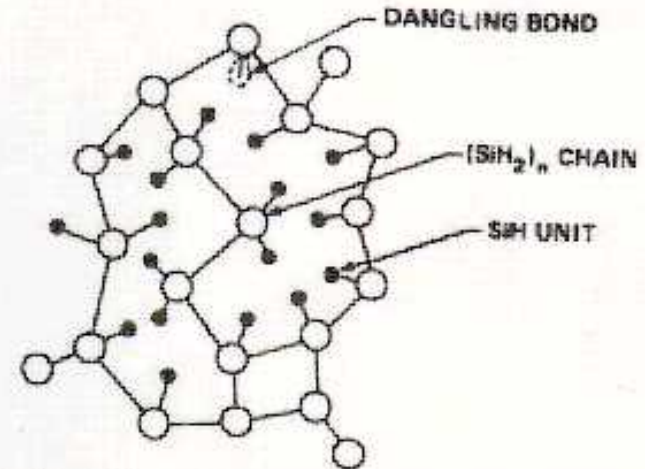


Fig. 14. Schematic of proposed defect in a-Si:H.

プラズマによる微結晶Si:H膜の形成(製膜条件の把握/実験データ)

微結晶Si:Hの構造モデル



微結晶シリコン膜

・形成条件把握のための実験研究

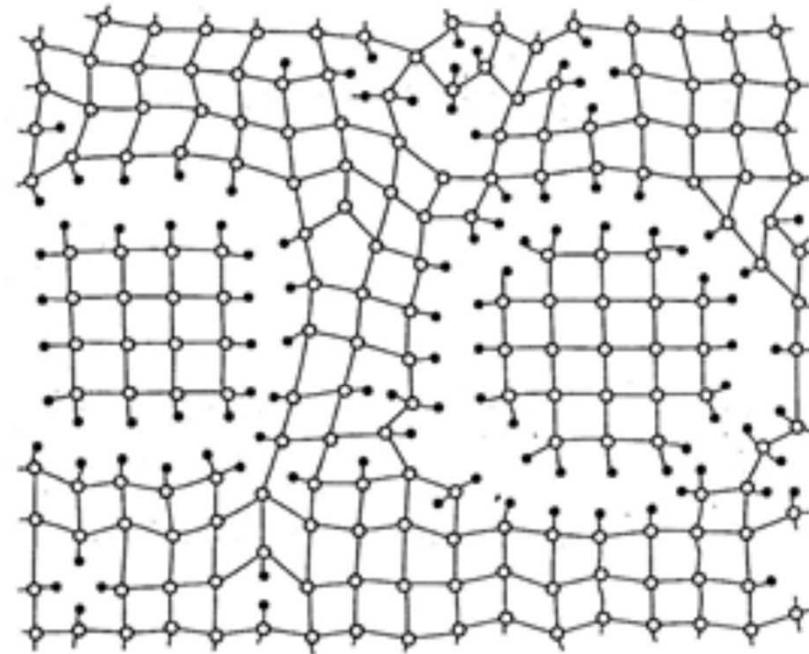


図1.2 $\mu\text{c-Si:H}$ の構造モデル。白丸がSi, 黒丸がHを表している²⁰⁾。

【出典】

松田彰久、電子技術総合研究所研究報告第865号、1986年4月

プラズマによる微結晶Si:H膜の形成(実験的研究/用いられた装置)

(1) 平行平板電極を用いたプラズマCVD装置

(2) プラズマ発光分析装置

(Optical Emission Spectroscopy: OES)

・プラズマ発光スペクトルを測定、

Si* (波長288nm)、SiH* (波長413nm)、H α (波長656nm)

(3) 質量分析装置

(Mass Spectrometry : MS)

H $^+$ 、H $_2^+$ 、Si $^+$ 、Si $_x^+$ 、Si $_2^+$ 、Si $_2$ H $_y^+$ のイオンを測定

・SiH $_4$ の分解エネルギー(閾値) = 8~9eV、
イオン化エネルギー = 11.9eV以上

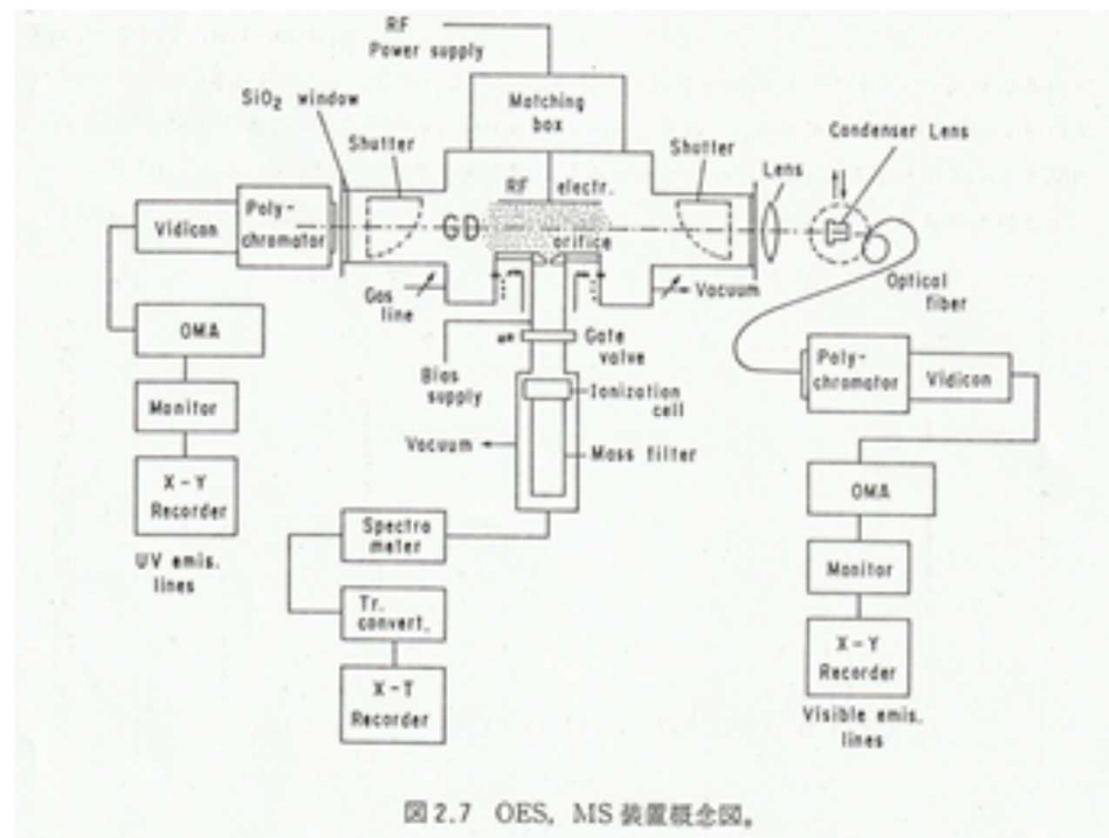


図 2.7 OES, MS 装置概念図。

【出典】松田彰久、電子技術総合研究所研究報告第865号、1986年4月

プラズマによる微結晶Si:H膜の形成(実験的研究/発光スペクトル)

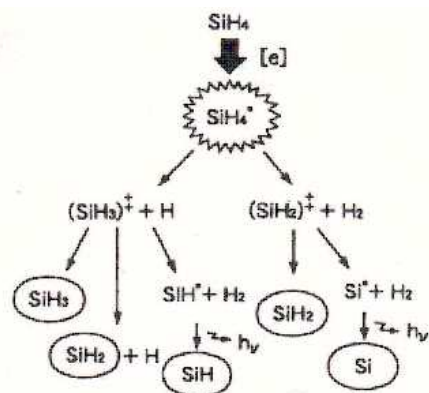
SiH₄プラズマの発光分析

Si* : 288nm

H* : H α : 656nm、

H β : 486nm、H γ : 434nm

SiH* : 413nm



(b) SiH₄分解過程

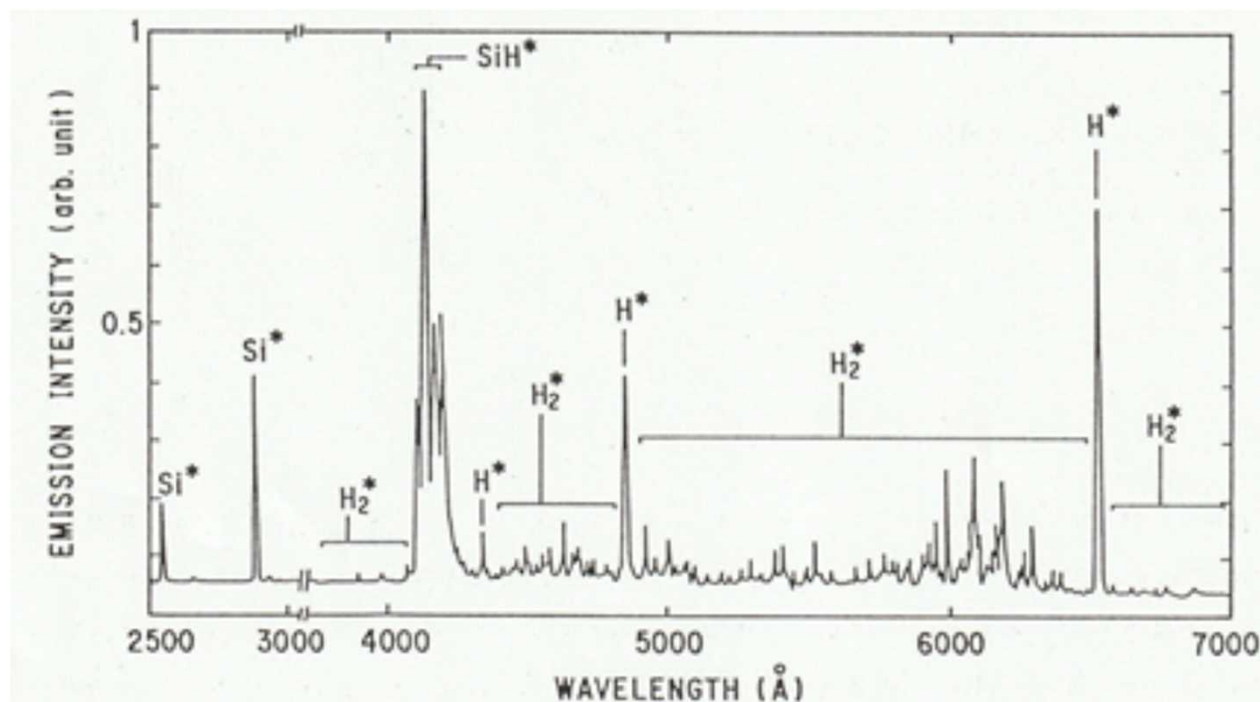


図 2.8 SiH₄プラズマの代表的 OES スペクトル²⁸⁾。

【出典】松田彰久、電子技術総合研究所研究報告第865号、1986年4月

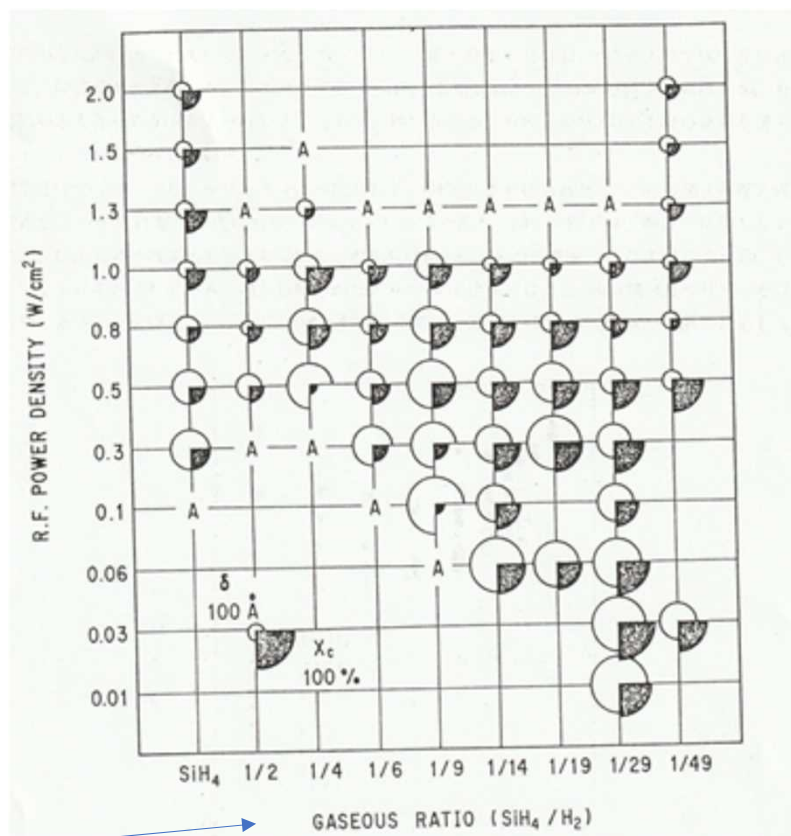
プラズマによる微結晶Si:H膜の形成(実験的研究/データ)

微結晶Si:Hの 製膜条件

- ・基板温度350°C一定
- ・ガス圧力(全圧)50mTorr一定
- ・**SiH₄/H₂=100%~1/49**
- ・RFpower=0.01~2W/cm²

RF電力密度

水素希釈率



【出典】松田彰久、電子技術総合研究所研究報告第865号、1986年4月

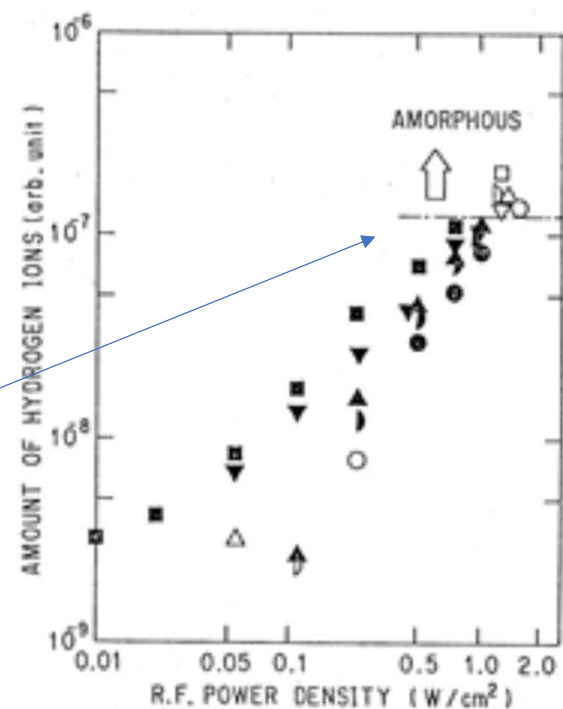
プラズマによる微結晶Si:H膜の形成(実験的研究/データ)

微結晶Si:H製膜における
イオン密度(イオン衝撃)の影響

H⁺、H₂⁺等のイオン密度が大きくなると、微結晶シリコン膜は成長しない、非晶質化される。

(微結晶化を阻害する)

高イオン密度
(高イオン衝撃)



RF電力密度

【出典】松田彰久、電子技術総合研究所研究報告第865号、1986年4月

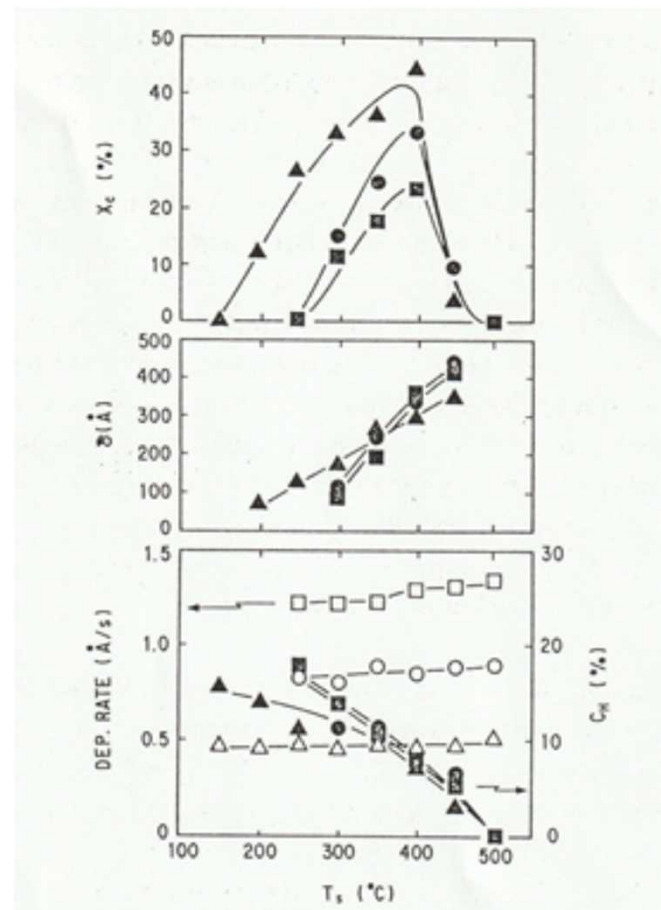
プラズマによる微結晶Si:H膜の形成(実験的研究/データ)

微結晶Si:H製膜における 基板温度依存性

製膜条件:ガス流量比 $\text{SiH}_4/\text{H}_2=1/14$ 、全圧50mTorr、

RF電力密度 $=0.13\text{W}/\text{cm}^2$ (▲、△)において、

400°Cで最大となる。



【出典】松田彰久、電子技術総合研究所研究報告第865号、1986年4月

プラズマによる微結晶Si:H膜の形成(製膜条件の把握/実験データ)

●松田彰久先生の微結晶Si膜の形成条件

- ・水素希釈率を大(H₂/SiH₄の流量比を大)
- ・イオン衝撃を抑制すること
- ・電力密度を大きくする(電力増大)
- ・基板温度=300~400°C

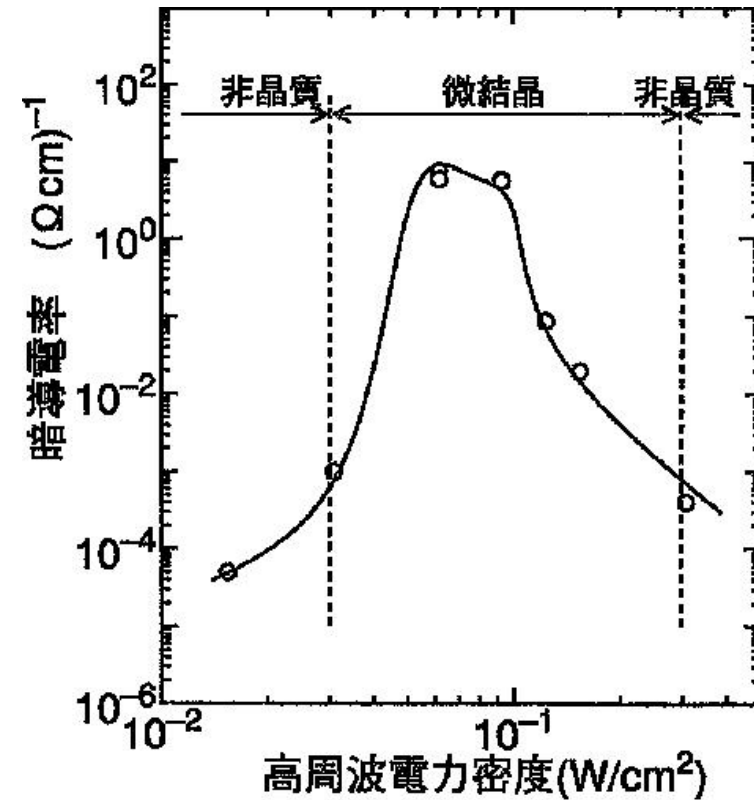
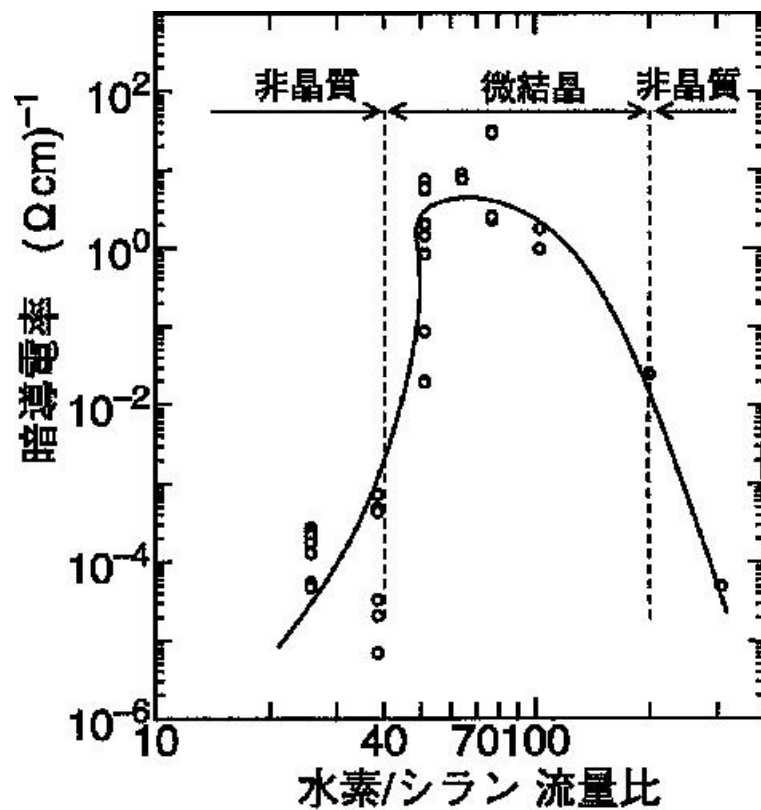
【出典】

松田彰久、電子技術総合研究所研究報告第865号、1986年4月

プラズマによる微結晶Si:H膜の形成(特許文献のデータ/事例1)

水素とシランの流量比を高くする、RF電力密度を高くする

【出典】特開平07-058014(日本電気)・・・1995年公開



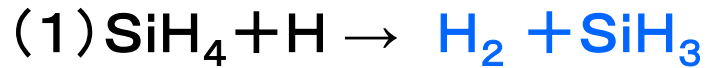
素反応過程 / a-Si及び微結晶Si膜形成の要点

●1次反応: electron が「SiH₄」「H₂」に衝突

→ SiH_x⁺、SiH_x⁻、SiH、SiH₂、SiH₃、H、H₂、Si、S
i*、SiH*

→ H、H*

●主たる気相反応(中性分子)



高次シランの
形成反応が
同時進行する
(プラズマ化学反応
の制御が重要)

善玉 = SiH₃

…8.75eV以上

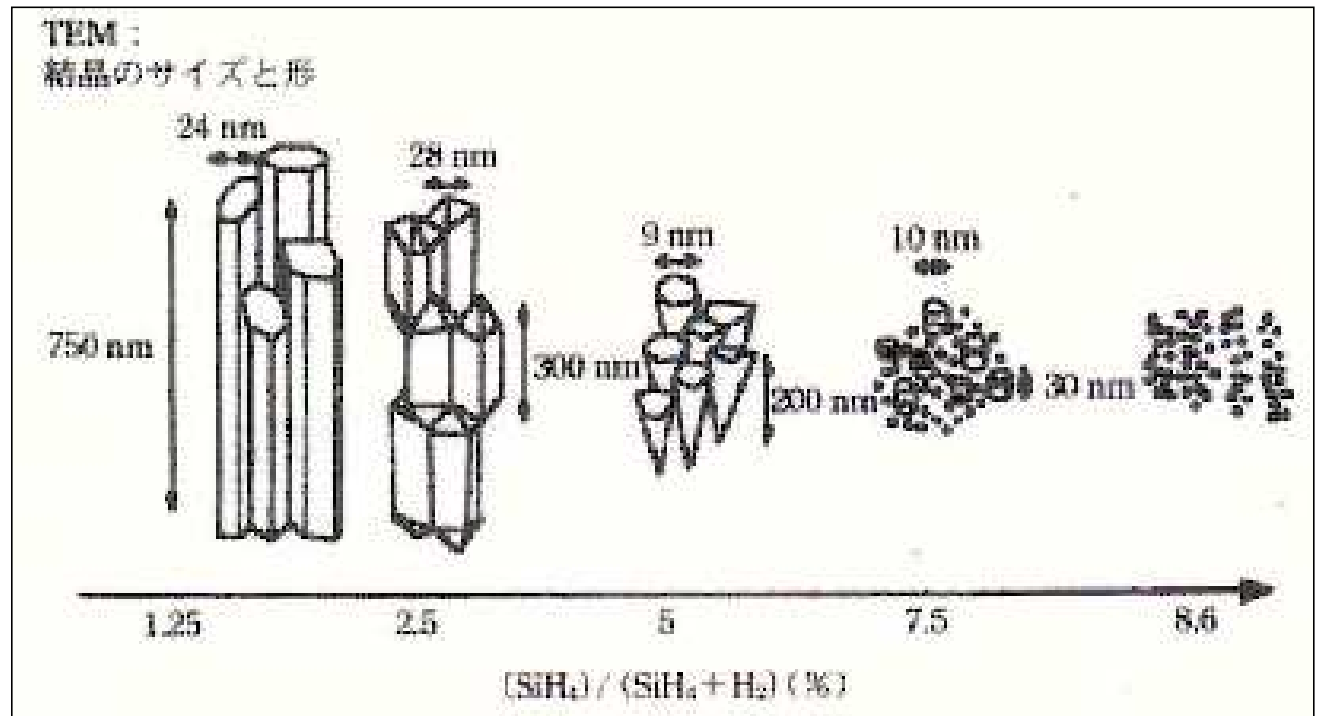
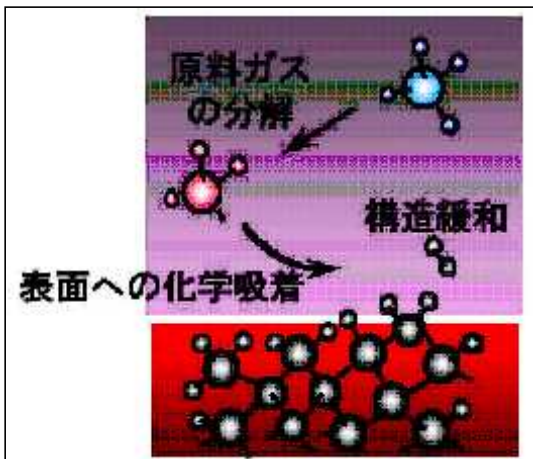
悪玉 = SiH₂

…9.47eV以上

プラズマ電位の低減化
プラズマ密度の増大化
(VHFプラズマ、ホローカ
ソードの採用)

プラズマによる微結晶Si:H膜の形成(柱状化)

・プラズマ電位が低い条件で
(即ち、イオン衝撃が抑制)、
大量のSiH₃、Hを発生させる

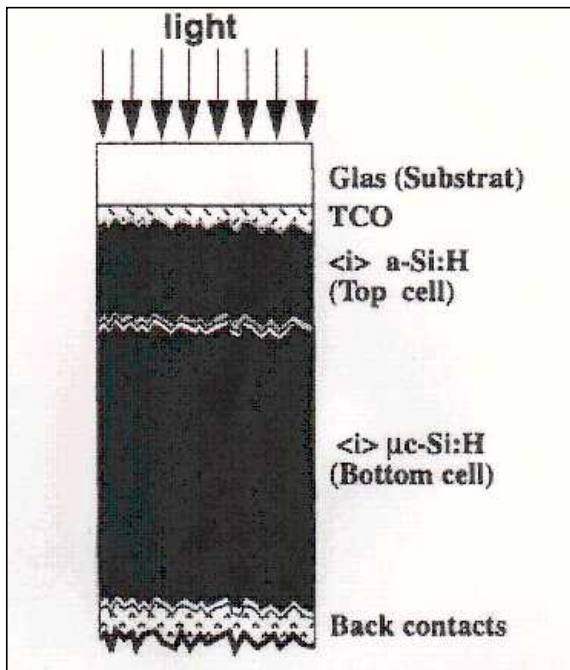


【出典】山本憲治:応用物理、Vol.71,No.5(2002)、522-528

世界初、微結晶Siセルの論文 VHFプラズマによる微結晶Si太陽電池の試作

J. Meier et al : Proc. of 1994 IEEE First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Vol.1(1994),409-412

- a-Si:H/ μ c-Si:H タンデム型太陽電池コンセプトの創出
- VHF(70MHz)プラズマで μ c-Si:Hを製膜
 メリット ⇔ 低イオンエネルギー・高水素原子流束
- 発電効率9.1%(小面積) ⇒ 1996年: 13.1%達成(小面積)



Micromorph tandem cells (a-Si:H/ μ c-Si:H)

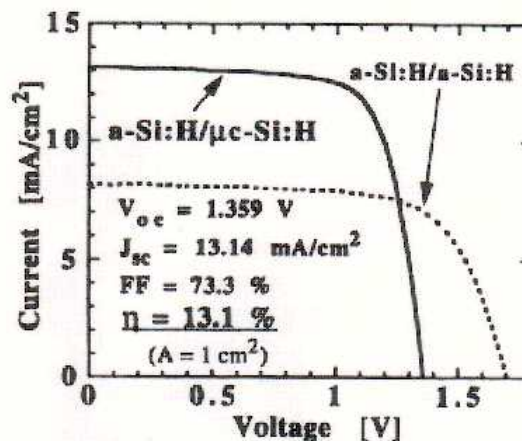


Fig. 12: I-V characteristics under AM1.5 conditions for the micromorph tandem cell, in comparison with a conventional a-Si:H/a-Si:H tandem cell.

この論文に刺激を受けて、
日本の薄膜Si太陽電池関連の研究者・技術者は、一斉に、微結晶Si膜の高速成膜技術の開発研究を開始した

微結晶Siの高速製膜に関する学術的データ(産総研)・・・微結晶Si形成→60MHz

M.Kondo et al. : Journal of Non-Crystalline Solids 266-269(2000),84-89

電源周波数60MHzであれば、
容易に、微結晶Si膜が形成される

- ・微結晶Si膜：製膜速度60MHz／5 nm/s を達成
- ・結晶化率：基板温度250°C、3.8 nm/sで良好

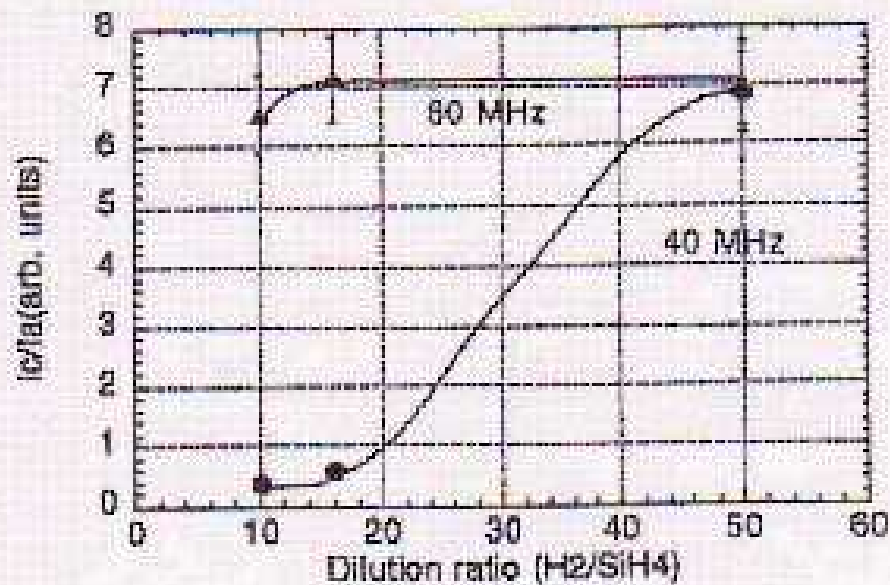


Fig. 4. Hydrogen dilution dependence of Raman crystallinity, I_c/I_a , for 40 and 60 MHz plasma. Deposition pressure was 50 mTorr, input power 120 W.

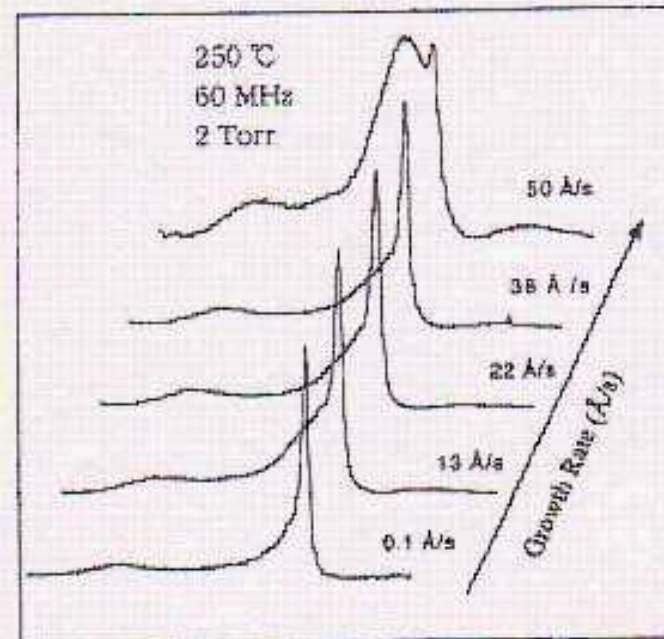
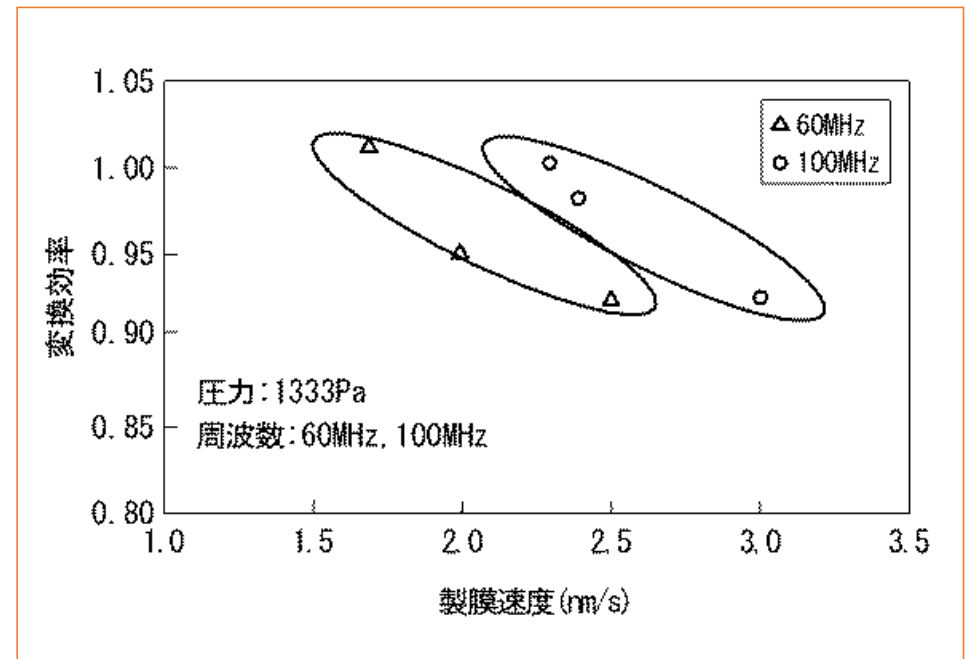
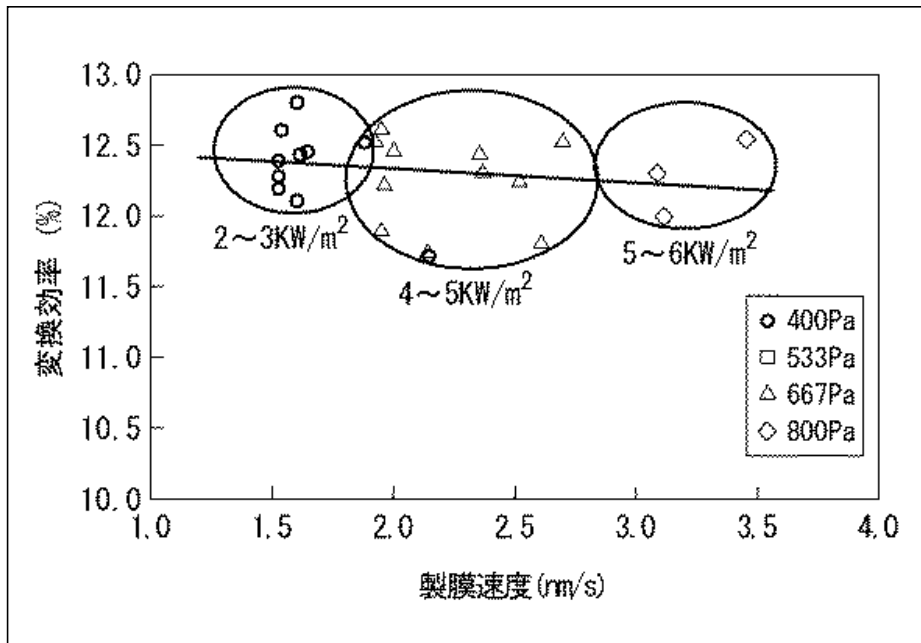


Fig. 7. Summary of the Raman spectra of c-Si for different growth rates under various conditions. Numbers at shoulders are the growth rate.

微結晶Siの高速製膜に関する代表的特許文献(三菱重工)・・・微結晶Si形成→60MHz
 (出典)呉屋真之ほか(三菱重工)、特許第4183688号、特開2006-216921

タンデムセルの高発電効率・高速製膜化・・・棒電極と平板電極とを備える放電電極

- ・ナローギャップ電極:8mm以下
- ・基板温度:180~220°C
- ・高圧力:600~2000Pa(4.5~15Torr)
- ・超高周波数:60MHz、100MHz
- ・パワー密度:3.0KW/m²以上



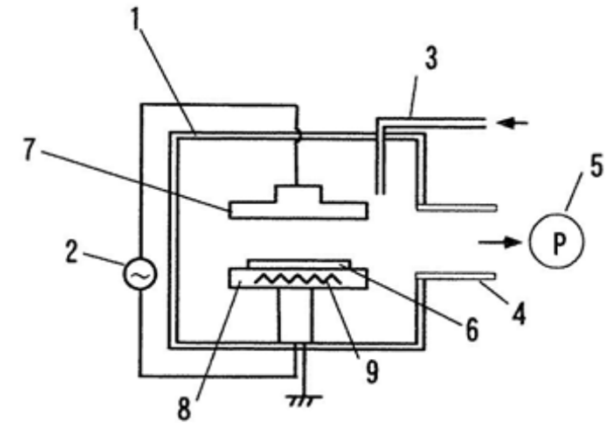
ホローカソード効果を活用した微結晶シリコン膜の高速・高品質化が可能な
プラズマCVD／高製膜速度・高品質 $\mu\text{Si:H}$ のデータ
(出典)新倉ちさと他(産総研)、特許3837539、特開2004-296526

電源周波数60MHz、ホローカソード電極を用いた装置

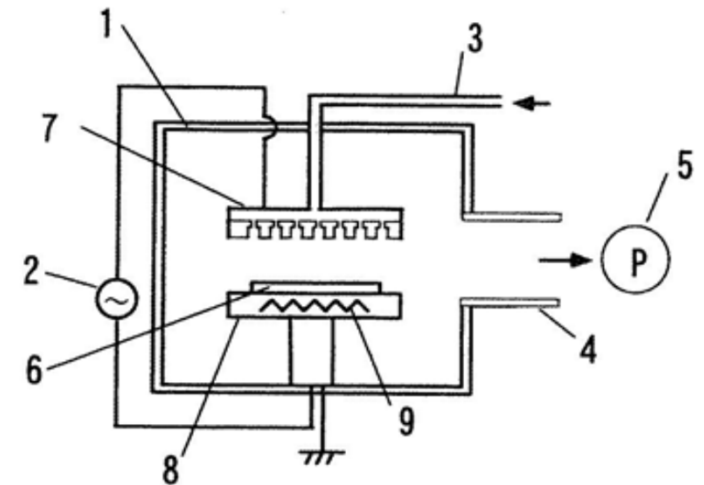
結晶性の良好な微結晶シリコン薄膜を
製膜速度7~10 nm/sにて作製した

欠陥密度が $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の高品質微結晶シリコン膜を、
8nm/s で高速作製した

従来装置



ホローカソード電極搭載の装置



ホローカソード効果を活用した微結晶シリコン膜の高速・高品質化が可能なプラズマCVD (出典)新倉ちさと他、特許3837539、特開2004-296526

成膜条件実施例

電源60MHz、電極間隔=7mm、投入電力525-925 W、
ガス圧力9.3Torr、基板温度100-400
H₂/SiH₄=300/15~50sccm

平行平板電極:面積128 cm²

ガスシャワーヘッド一体型カソード板

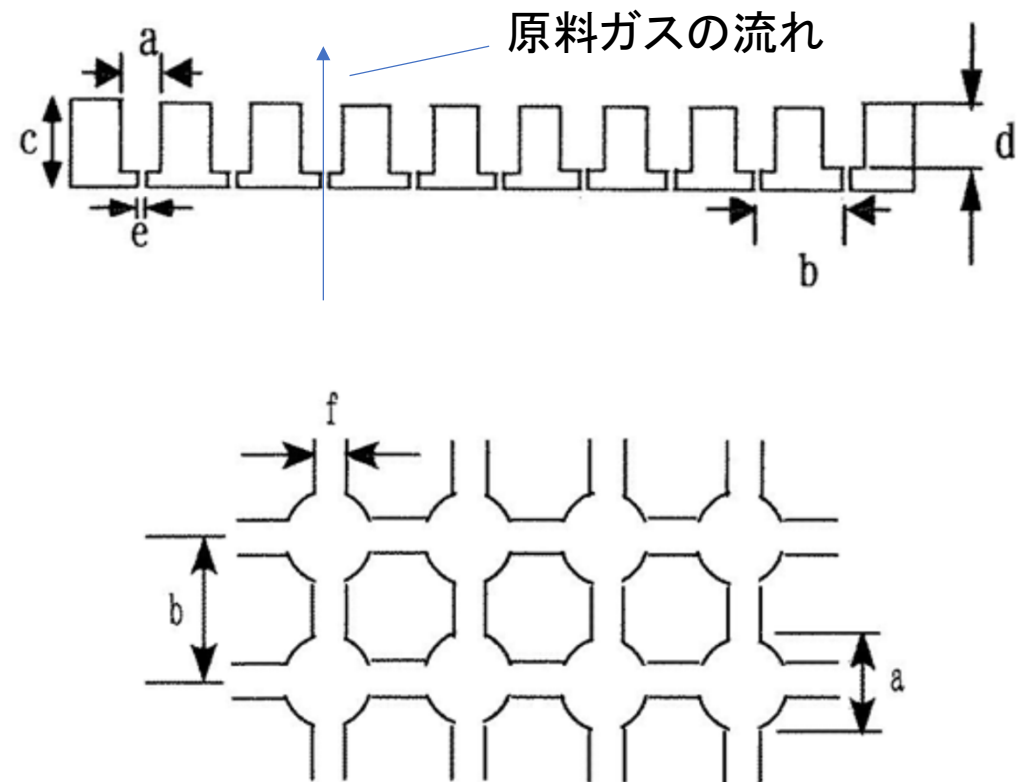
(a, b, c, d, e, f) = (2, 3, 5, 4, 0.5, 1) 及び
(1, 1.5, 5, 4, 0.5, 0.5) (mm)

原料ガス:SiH₄及びH₂

ガラス基板の上に微結晶シリコン薄膜の作製を行った。

製膜中のプラズマ発光状態を、Si*からの波長288 nm近傍又はH_αからの656 nm近傍の発光のみを透過させる光フィルタを介して観測すると、

凹部から噴き出すかたちで強い発光強度が観測された。



微結晶Si製膜の要点(1/2)

① **大量の水素**を供給すること(H_2/SiH_4 の流量比を高くすること、例えば、50/1)

Hラジカルの大量発生

② **プラズマ密度を高く**すること
(大電力を供給→電力密度を増大すること)、
例えば、数W~数10W/cm²

SiH_3 、Hラジカルの大量発生

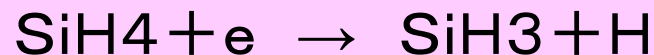
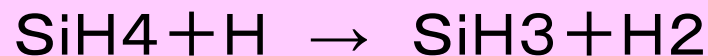
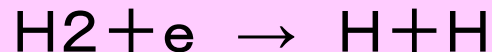
③ **プラズマ電位を低く**すること(プラズマの電子温度を低くすること)、
例えば、プラズマ電位=5V程度以下

基板表面へのイオン衝撃抑制

④ **基板温度を適正化**すること(300度以下)

基板表面での SiH_3 ラジカルの適度な運動促進

重要なプラズマ反応式及び気相反応式



微結晶Si製膜の要点(2/2)

必須要件

- ② プラズマ密度の増大
(SiH₃, Hラジカルの発生濃度増大)
- ③ プラズマ電位の低減
(イオン衝撃の低減)



RF(13.56MHz)を用いたプラズマは、イオン衝撃が大きい

上記②③を満たすことができない



実現する手段

(1) VHFプラズマを活用

・低い電子温度・高密度プラズマ化を容易に実現

(2) ホローカソード効果を活用

・高密度プラズマ・低電子温度(低プラズマ電位)を容易に実現

3. 微結晶Si製膜を実現する2つの方法(装置)

微結晶Si膜形成の重要条件

- ②高プラズマ密度のプラズマ発生
(SiH₃, Hラジカルの発生濃度増大)
- ③低プラズマ電位のプラズマ発生
(イオン衝撃の低減)



RF(13.56MHz)を用いたプラズマCVDでは、
上記②③を満たすことができない



実現する手段

(1)VHFプラズマ

・低い電子温度・高密度プラズマ化を容易に実現

(2)ホローカソードプラズマ

・高密度プラズマ・低電子温度
(低プラズマ電位)を容易に実現

VHFプラズマの世界初の論文

a-Si:H膜の高速製膜(30-150MHz)

・平行平板電極・・・高速製膜

H.Curtins et al: Mat.Res.Soc.Symp.Proc.Vol.95(1987),249-253

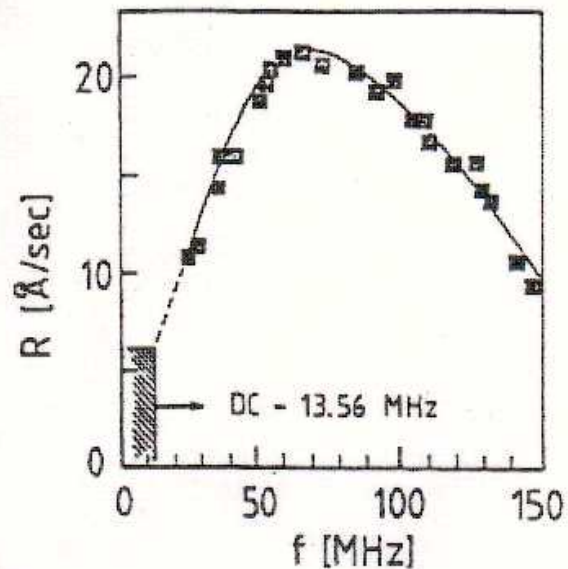
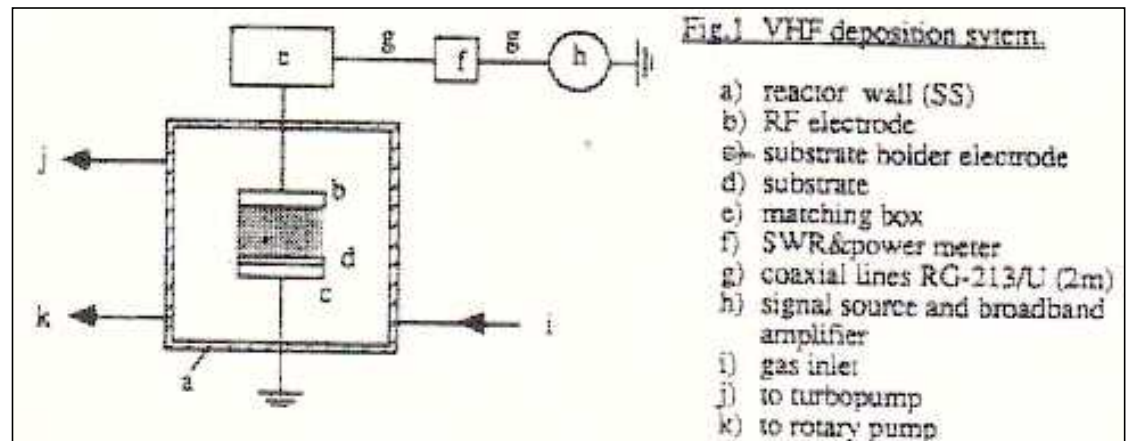


Fig.2 Deposition rate R as function of plasma excitation frequency f . The deposition parameters are: $T_s=280$ °C, $P=0.1$ W/cm³, $p=0.28$ mbar and $F_{SiH_4}=20$ sccm.



a-Si:H膜の高速製膜(13.56~250MHz)

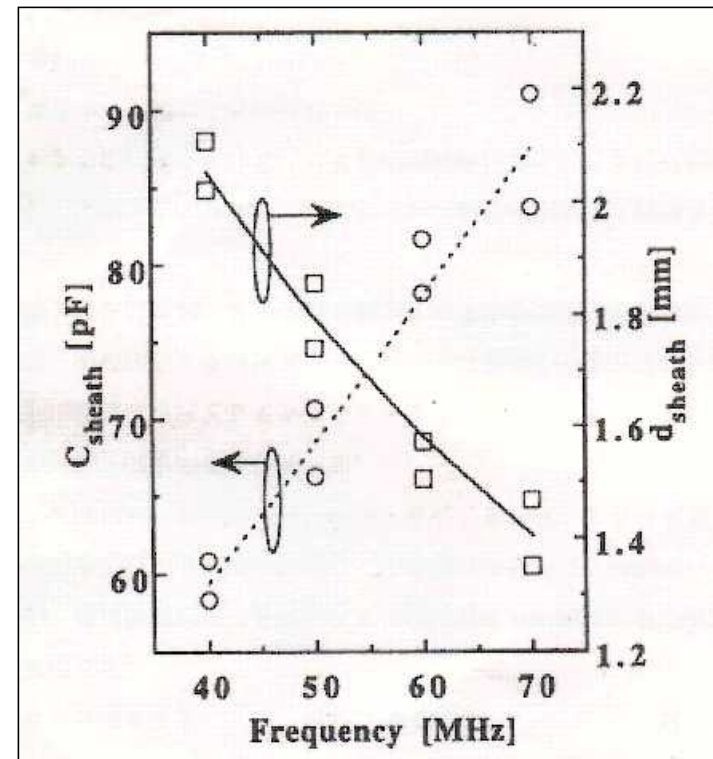
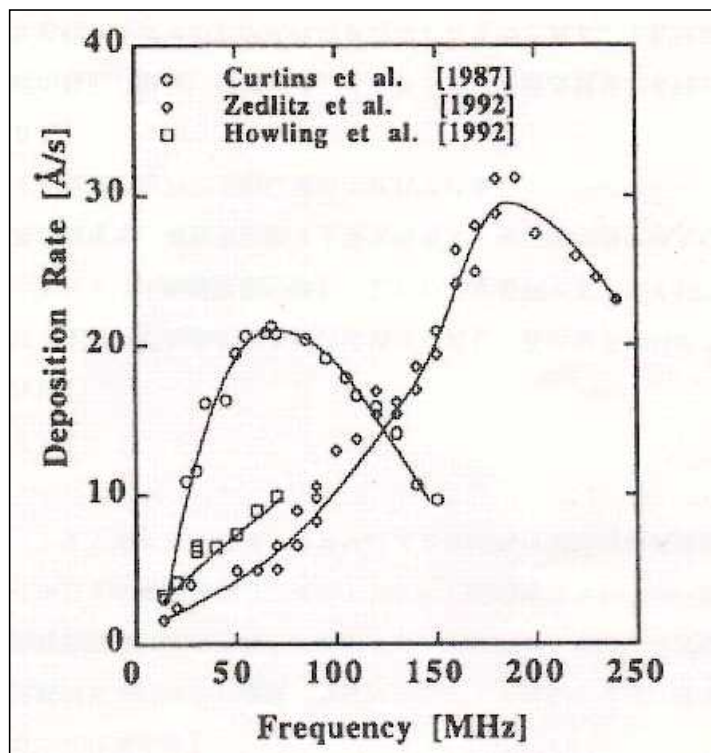
・平行平板電極

U.Kroll et al :

Solar Energy Material and Solar Cells, Vol.48(1997),343-350

● a-Si:H製膜速度／放電周波数の関係

● プラズマシース厚さ／放電周波数の関係



VHFプラズマCVDの特徴／電源周波数＝30MHz～300MHzを使用

- (a) 電子密度が高く、プラズマ電位が低い・・・高品質ラジカル発生が容易、かつ、イオン衝撃が少ない
- (b) 波長が短いので、定在波及び浮遊インピーダンスの影響が大きく、プラズマの均一化が困難

長所

- ①SiH₄を効果的に分解し、製膜速度が向上する
- ②高速製膜時のパーティクルが少ない
- ③高速製膜でも、高品質製膜が可能

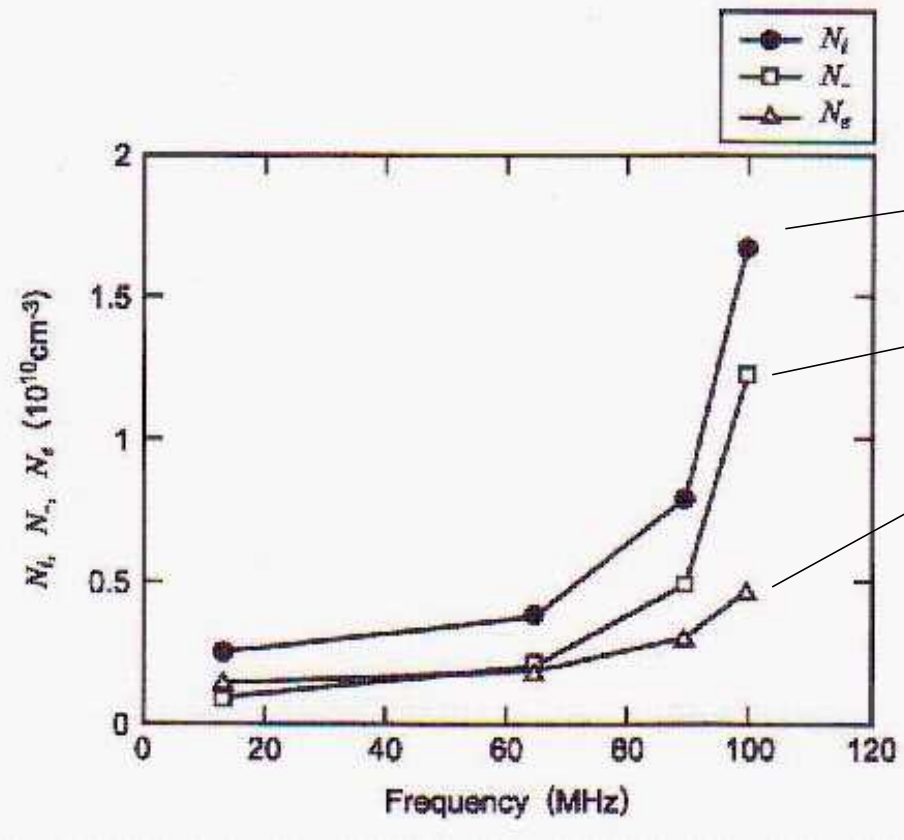
短所

- ①大面積基板を対象にした装置化が困難
- ②製品化成功例は三菱重工(60MHz、70MHz)、Oerlikon(40MHz)以外に無い

SiH₄ガスを用いたVHFプラズマの特性(特徴)／高プラズマ密度

(出典)Y.Takeuchi et al:

Surface and Coatings Technology 142-144(2001),52-55



プラズマ密度Ni

負イオン密度N-

電子密度Ne

供給電力=150W

圧力=20mTorr

SiH₄ガスを用いたVHFプラズマの特性(特徴)／低い電子温度

(出典)竹内良信他、特開2005-244037(三菱重工)

実験データ

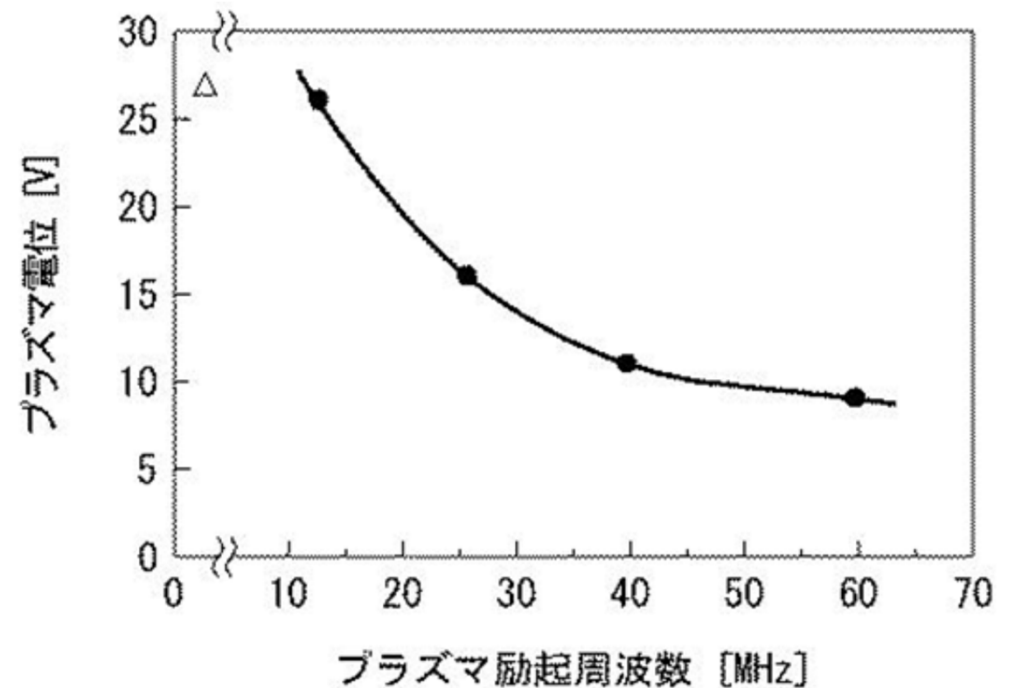
製膜時のプラズマ励起周波数とプラズマ電位との関係を示す

製膜圧力350Pa、
電極間隔が5mmの場合

プラズマ電位が20V以下になるのは、プラズマ励起周波数が20MHz以上の場合であることが分かる。

プラズマ電位は、その後少なくとも60MHzまでは単調減少)。

従って、プラズマ励起周波数は、20MHz以上が好ましいことが分かる。



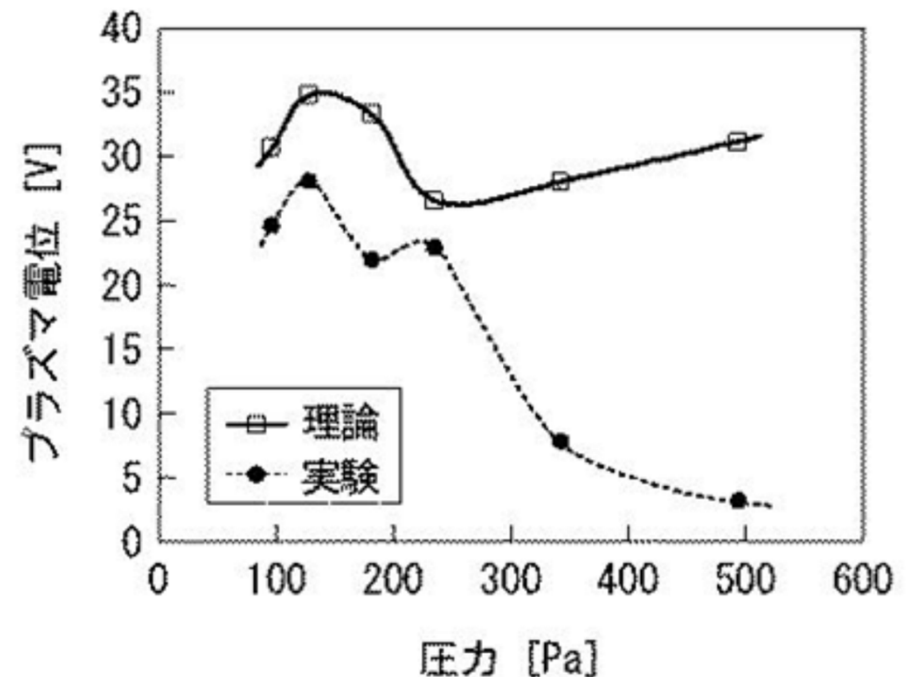
SiH₄ガスを用いたVHFプラズマの特性(特徴) / プラズマ電位が低い (出典)竹内良信他、特開2005-244037(三菱重工)

VHF周波数(60MHz)では、
圧力の増加に伴い、**プラズマ電位10V以下**

このプラズマで形成される微結晶のシリコン膜の品質は、280Pa以上の圧力(プラズマ電位20V以下)で高品質になる。

微結晶Si膜形成条件

・・・VHFプラズマ、かつ、280Pa以上の圧力を設定



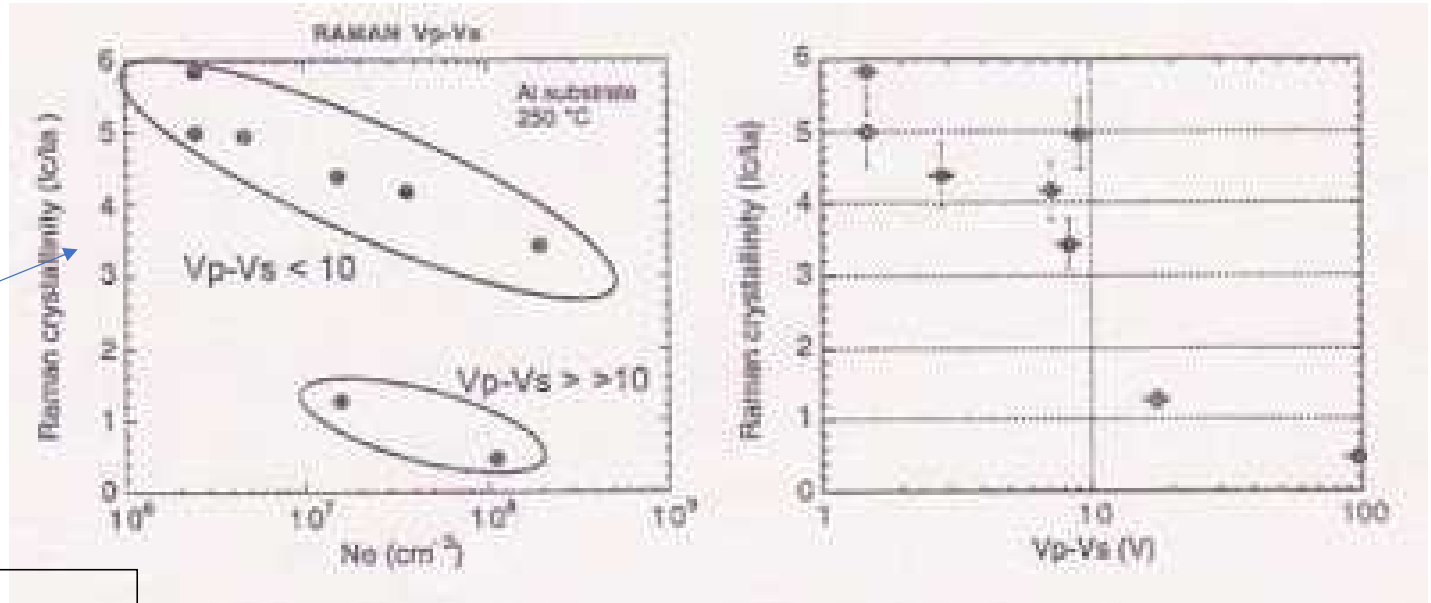
SiH₄ガスを用いたVHFプラズマの特性(特徴)

近藤道雄、松田彰久(産総研)

結晶化度:

ラマン強度比

$I_c(520\text{ cm}^{-1})/I_a(480\text{ cm}^{-1})$



シース電位

(プラズマ電位と基板電位の差)と、
薄膜(厚=500 Å)の結晶化度の関係



●シース電位が10V以下であれば、ラマン強度比は高い

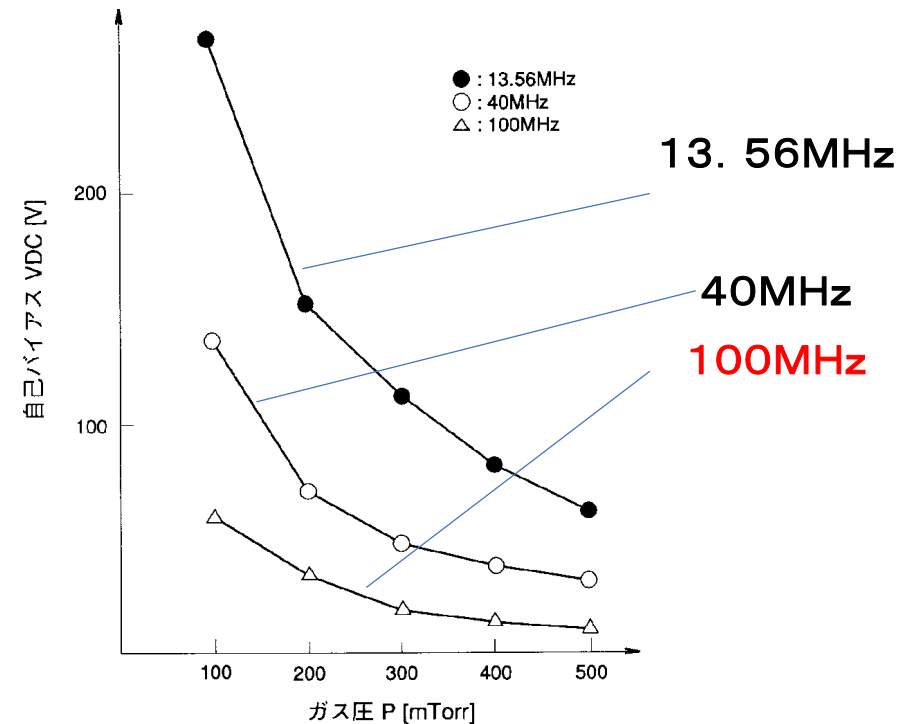
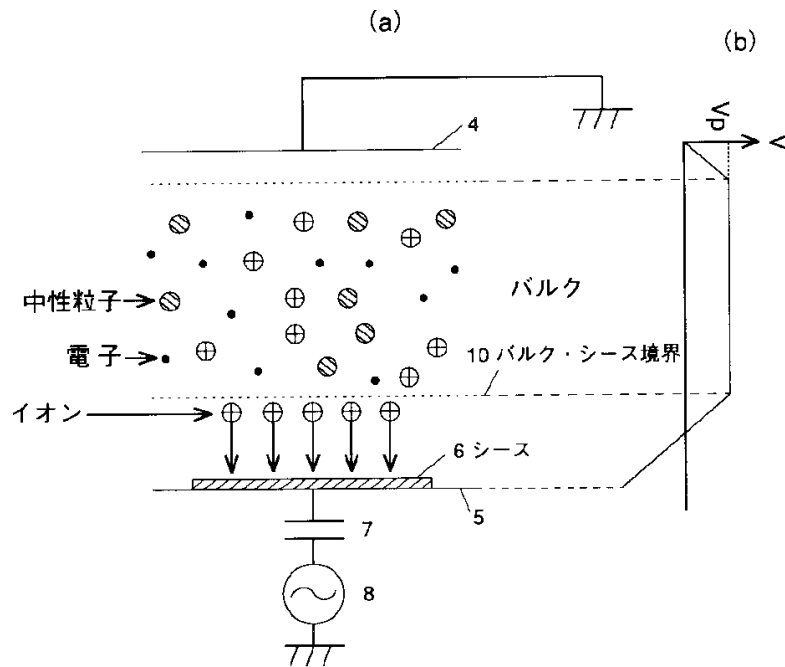
(出展)近藤道雄、松田彰久:日本学術振興会プラズマ材料科学第153委員会、
第49回研究会資料(2001.2. 9), P16-23

VHFプラズマの特性(特徴)

山野敦浩ほか(松下電器)

自己バイアスの
周波数依存性

・周波数が高くなると自己バイアスが低下(イオン損傷が抑制)



【出典】山野敦浩ほか(松下電器)、エッチング装置におけるVHFプラズマ
:特許第3067289号、特願平3-180835(出願日1991. 7. 22)

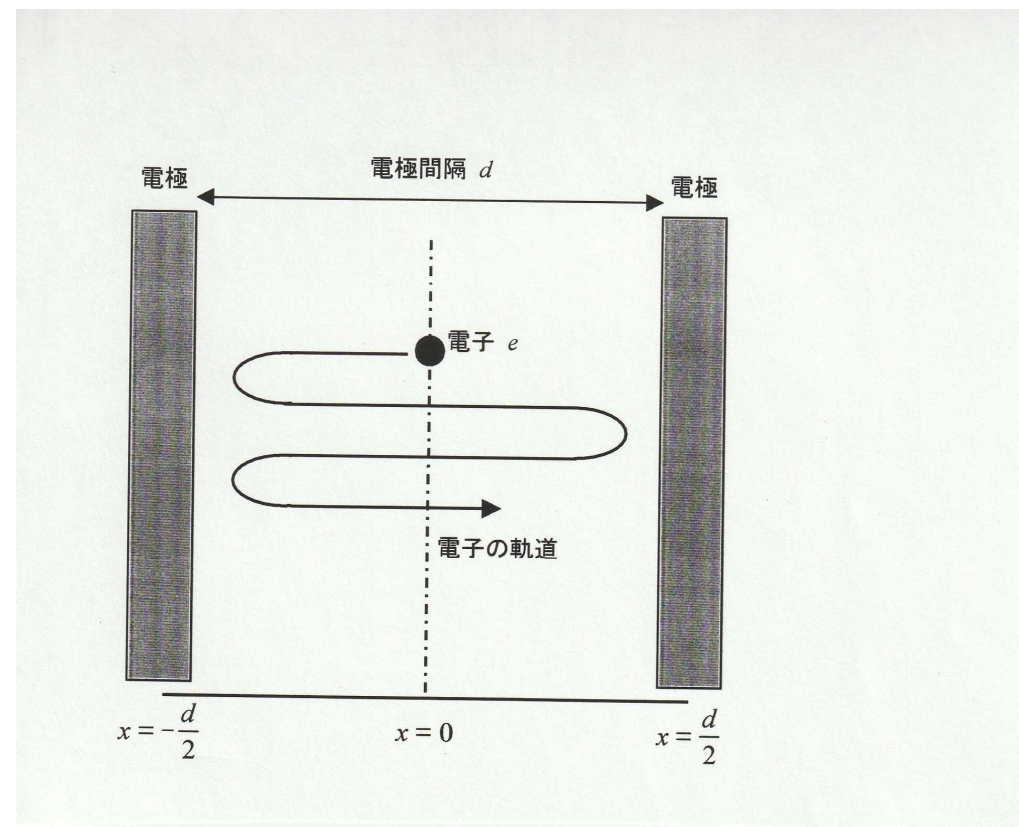
VHFプラズマの特性(特徴)・・・何故か？

何故か？

電子密度が高い、
電子温度が低い
(プラズマ電位が低い)

電極間で超高周波数で変化する
電界に追従できず、空間に補足さ
れる現象が起こる

(電子トラッピング／捕捉)



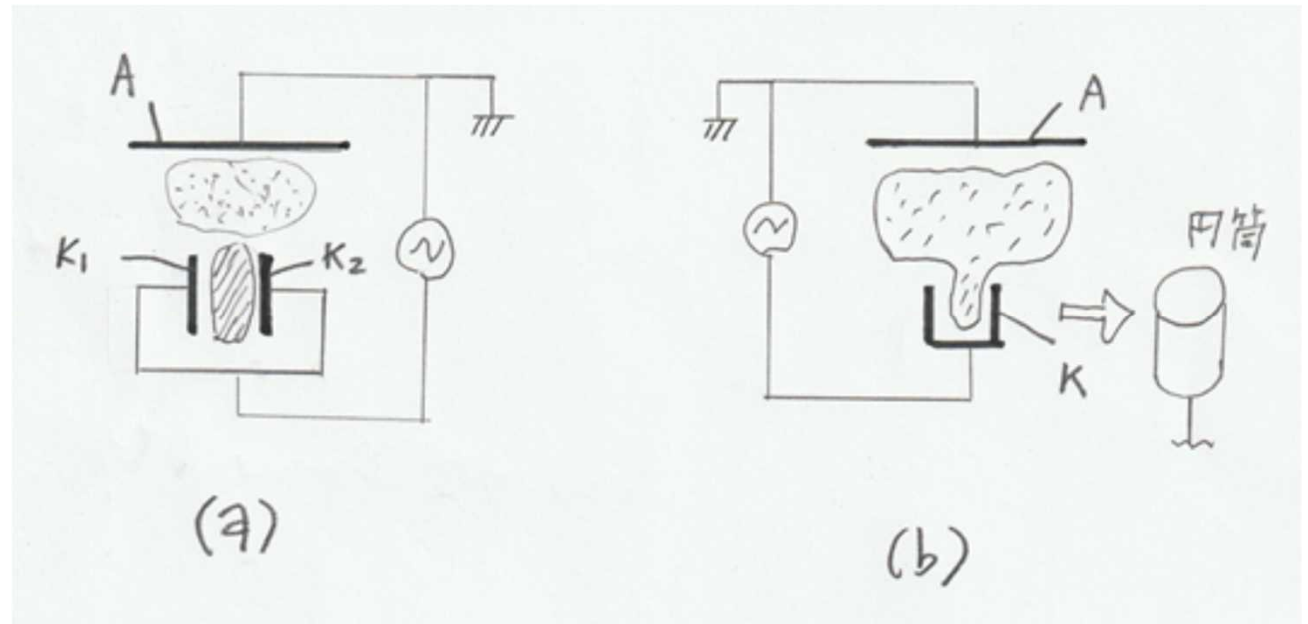
ホローカソード放電の特徴(放電形態)

ホローカソード放電の形態

例えば、2個の平板陰極K1、K2の間隔を小さくしていくと、その間に負グローが発生し、強く発光する。

また、陽極Aと陰極K1の間の放電維持電圧が大幅に低減する。

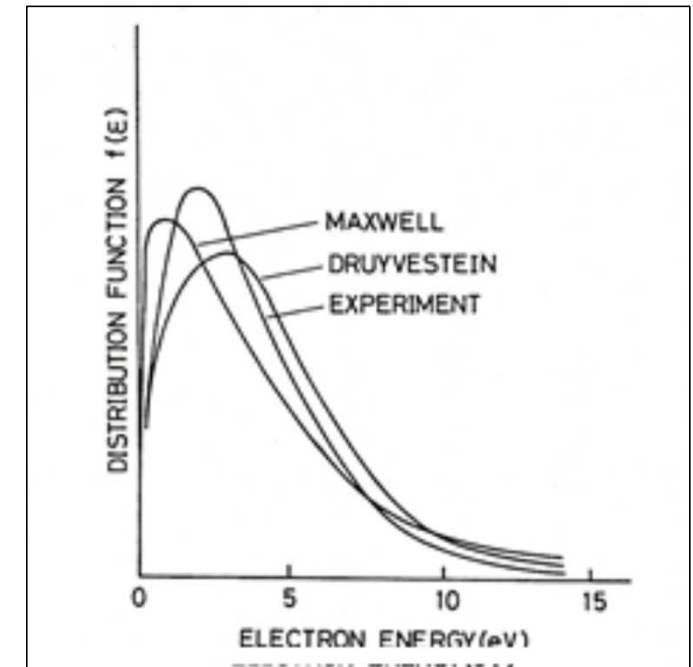
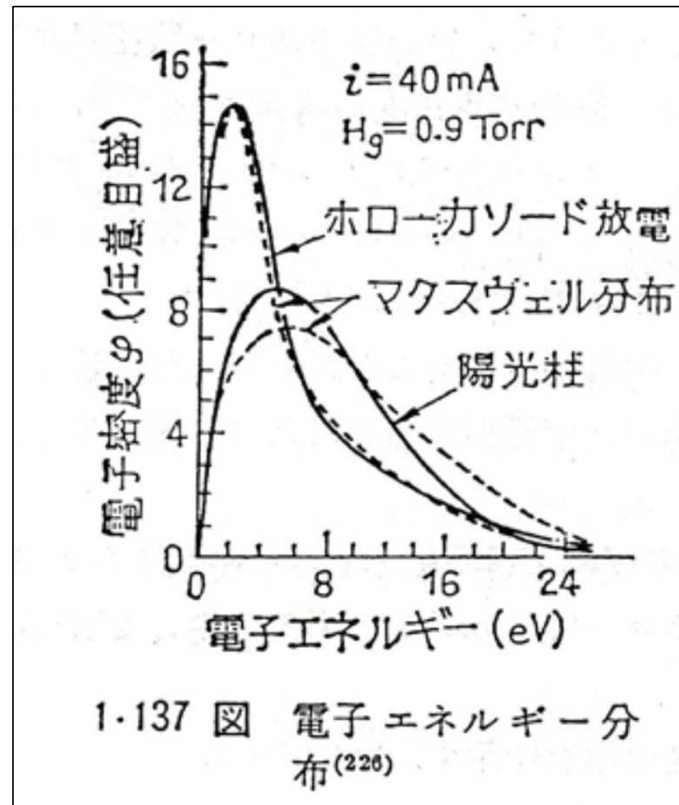
陰極が円筒形の場合、その直径を小さくしていけば、ホローカソード放電が発生する。強い発光を伴う。



【出典】林泉他、プラズマ工学演習、朝倉書店(1995. 9, 15初版)、49-50.

ホローカソード放電の特徴(電子エネルギー分布)

ホローカソード放電は、
通常の放電形態(マックス
スウエル分布)に比べて、
電子密度が増大し、かつ、
電子温度が大幅に低くなる。



【出典】電気学会編集、放電ハンドブック、電気学会(昭和49年2月15日初版)、132-134.

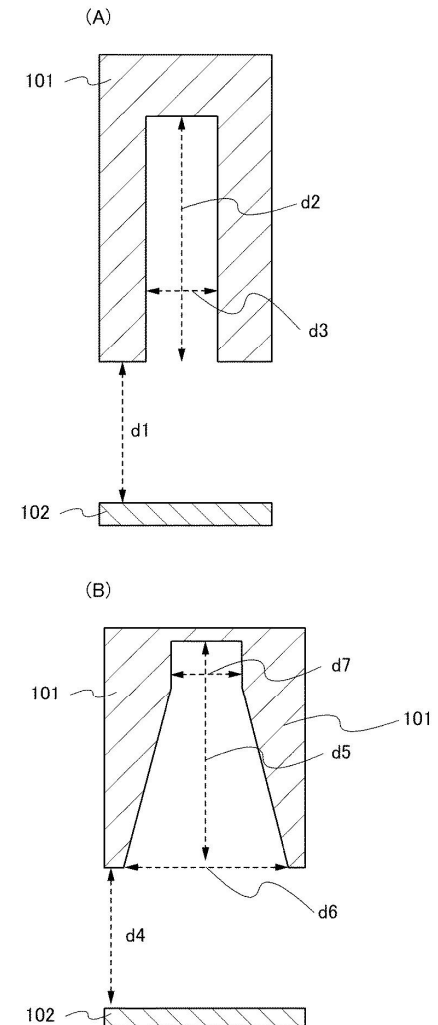
ホローカソード放電の特徴(円筒形、円錐形)

プラズマポテンシャル、シランの密度分布、及びシランの生成レートについて、CFD Research Corporation によって開発されたマルチフィジックス解析ソフトウェア CFD-ACE+を用いて計算した。

(A)図において、第1の電極101及び第2の電極102の間隔 $d1$ を8mm、凹部の深さ(即ち円柱の高さ) $d2$ を15mm、隣接する凸部の間隔(即ち円柱の直径) $d3$ を4mmとした。

(B)図において、第1の電極101及び第2の電極102の間隔 $d4$ を8mm、凹部の深さ(即ち円錐台の高さ) $d5$ を15mm、隣接する凸部において第2の電極102の頂部側の間隔(即ち円錐台の底面の直径) $d6$ を11.6mm、とした。なお、凹部においてガス供給口が形成される平面の幅(即ち円錐台の上面の直径) $d7$ を4mmとした。

【出典】山崎 舜平(半導体エネルギー研究所)、特開2011-071497



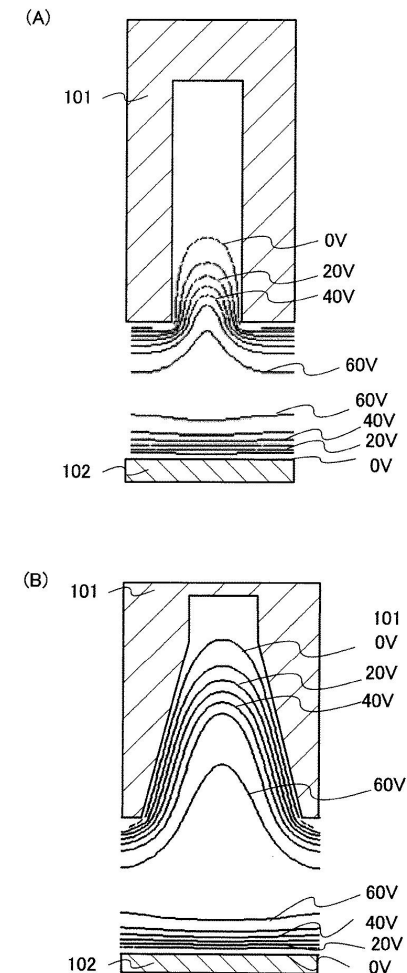
ホローカソード放電の特徴(プラズマ電位分布)

プラズマCVD装置の反応室

流量15sccmの水素及び流量0.1sccmのシランを導入し、

圧力を1000Paとし、水素及びシランの温度を250°Cとし、周波数13.56MHzの高周波電力(電圧振幅が200V)を供給したと仮定して計算により得られた、**時間平均のポテンシャル分布**を図18に示す。

【出典】山崎 舜平(半導体エネルギー研究所)、特開2011-071497

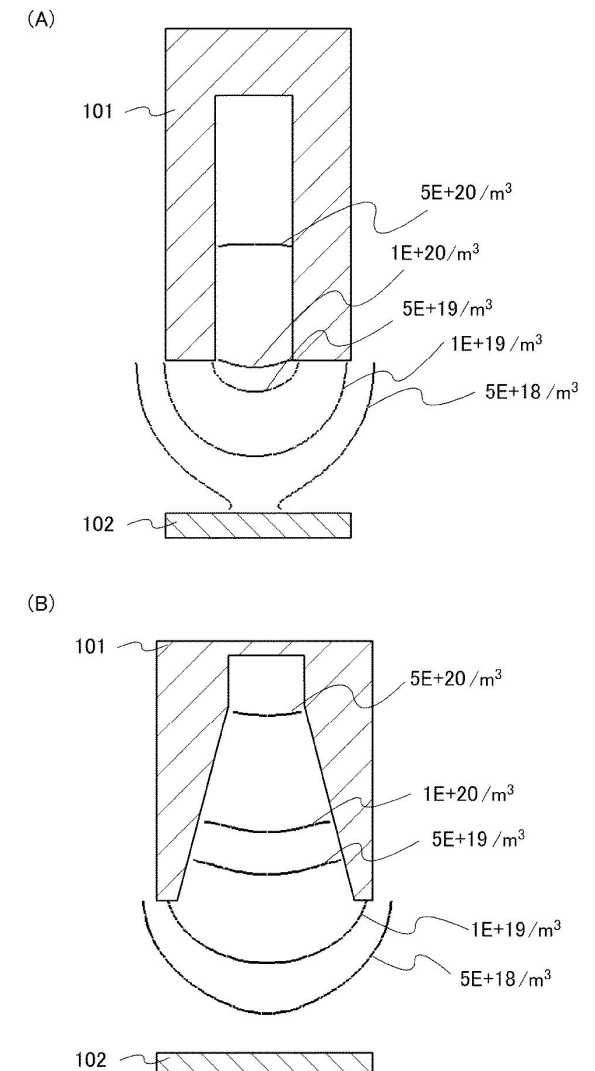


ホローカソード放電の特徴(シランの密度分布)

同様に、プラズマCVD装置の反応室に流量15sccmの水素及び流量0.1sccmのシランを導入し、

圧力を1000Paとし、水素及びシランの温度を250°Cとし、周波数13.56MHzの高周波電力(電圧振幅が200V)を供給したと仮定して計算により得られた

シランの密度分布を図19に示す。



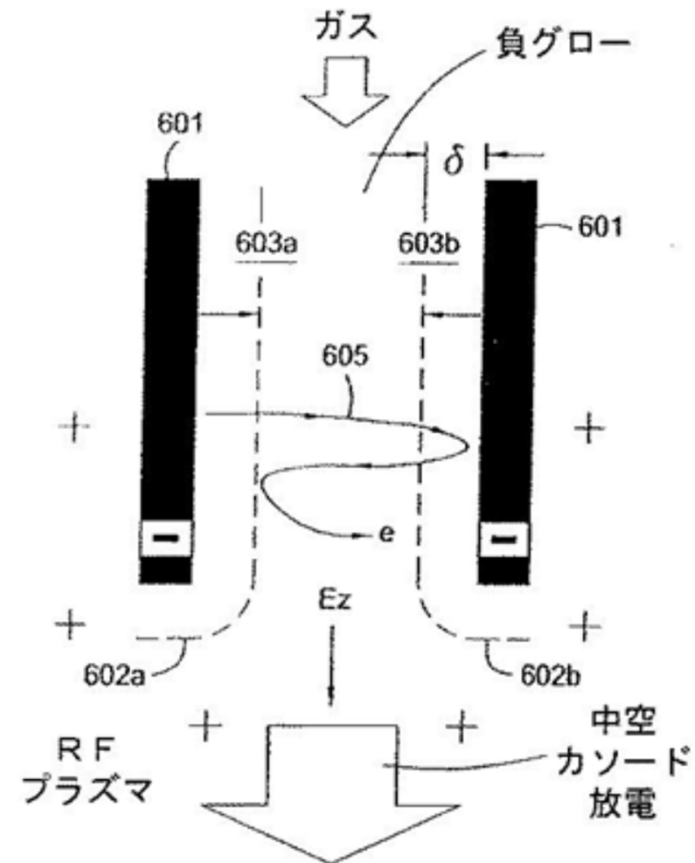
【出典】山崎 舜平(半導体エネルギー研究所)、特開2011-071497

ホローカソードプラズマの特性(特徴)・・・何故か？

何故か？

電子密度が高い、
電子温度が低い
(プラズマ電位が低い)

穴の壁にできる近接し、かつ、
対向するシース(厚み δ)の間
で、**電子の振動**が起こる



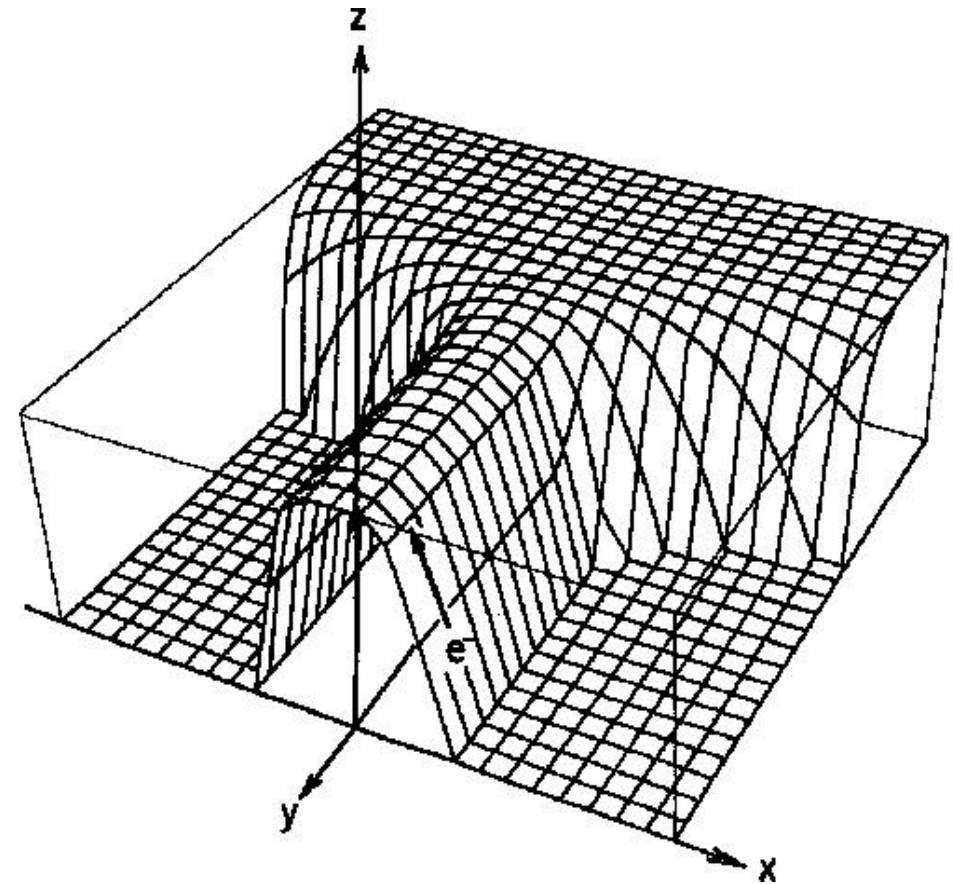
ホローカソードプラズマの特性(特徴)・・・何故か？

電子の捕捉

図の中に、 e^- で示した位置に置かれた電子は、図中の矢印の方向に沿って(上の方へ)落ちていくことになる。

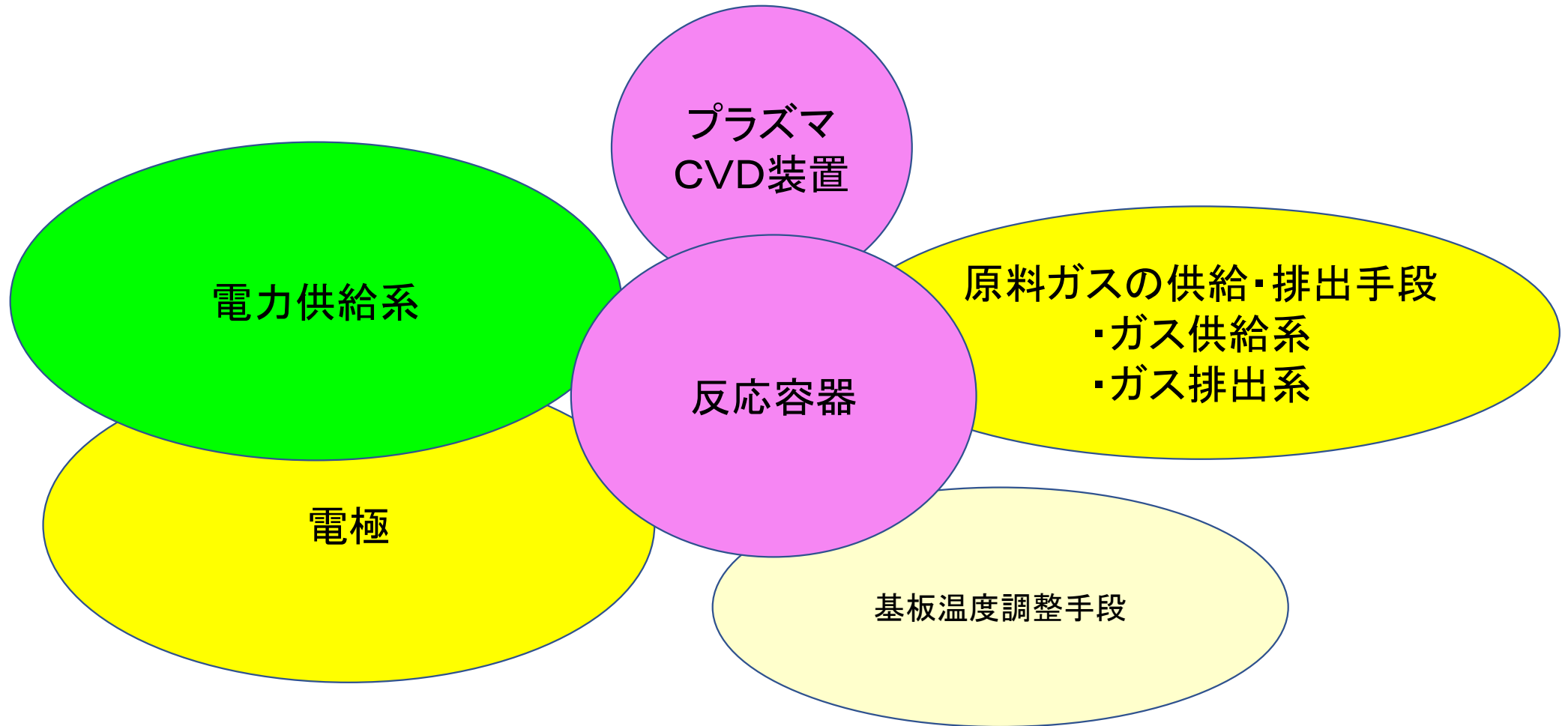
ポテンシャルの谷(図中の電位の山)に達した電子は勢い余って反対側のポテンシャルの坂を登り、再び落ちてくる。

このようなブランコのような**往復運動**が**電子捕捉の本質**である。

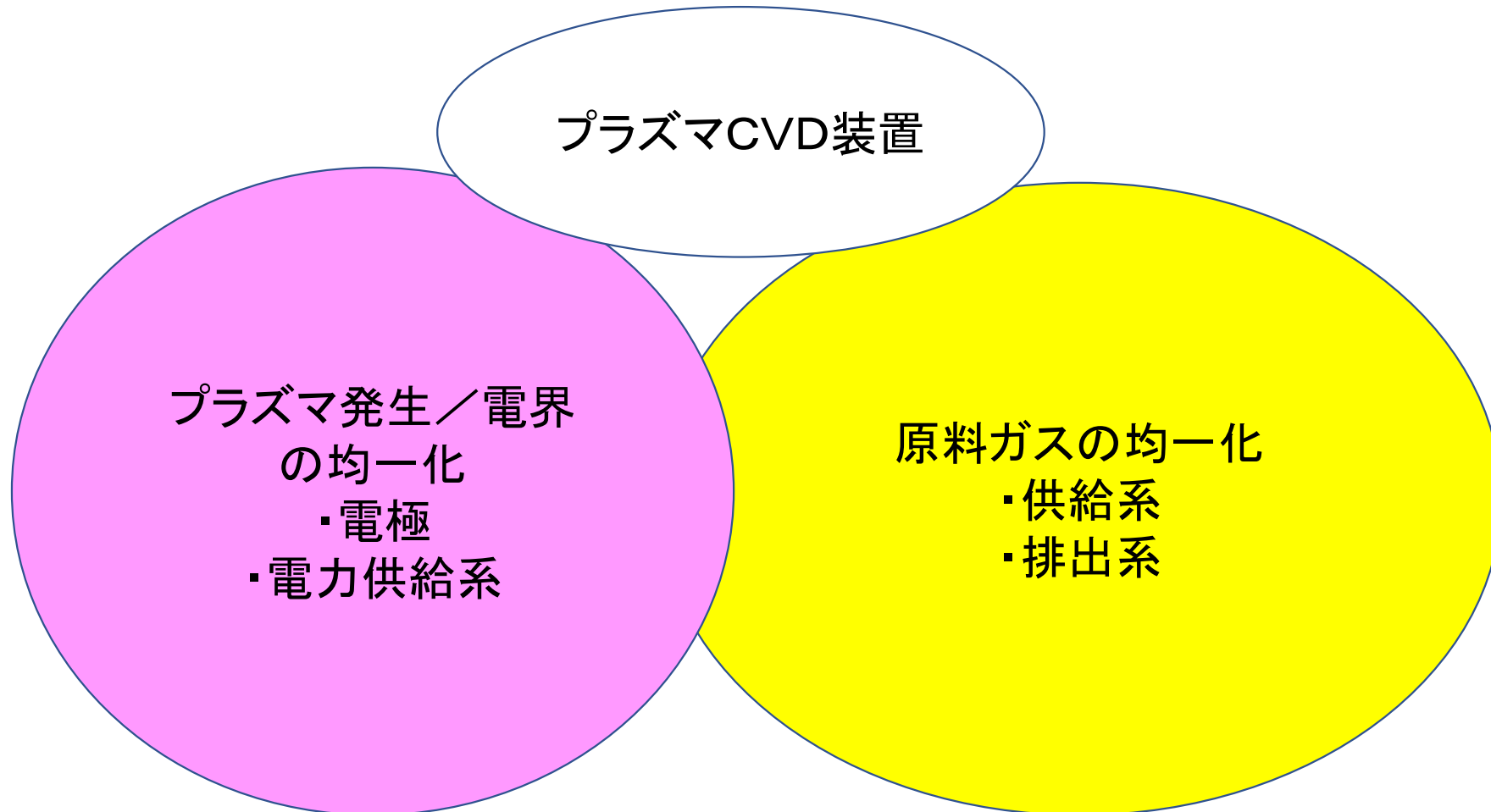


【出典】横川 直明ほか(アネルバ):特開平
09-022798

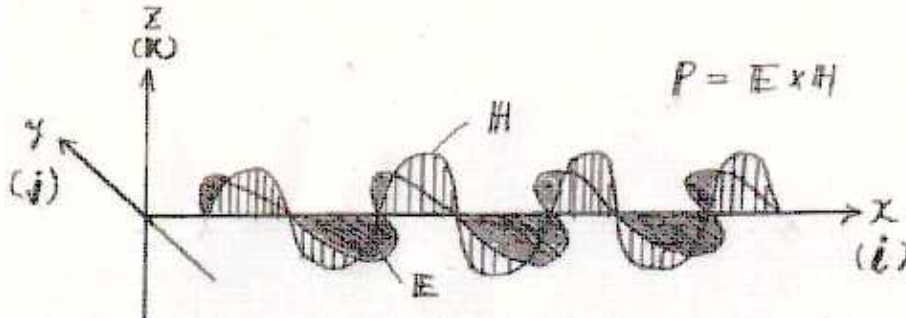
4. プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項



4. プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項



電磁波の伝播(電力伝送)に関する基本事項(1) ポインティングベクトル $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$



電磁波のエネルギー

→ ポインティングベクトル \mathbf{P}

● $\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ (電場 \mathbf{E} と磁場 \mathbf{H} のベクトル積)

電磁波が平面波の場合

● $H_x = H_y = 0, E_x = E_z = 0$

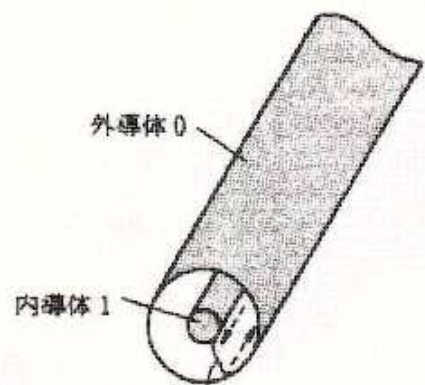
● $\mathbf{P} = c\epsilon (E_y)(E_y) \propto$ 電場(E_y)の二乗

・・・エネルギーは $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ 方向へ流れる(伝播する)

c : 電磁波伝播の速さ、 ϵ : 誘電率

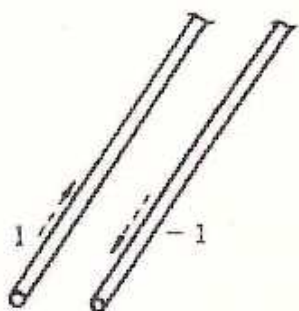
電磁波の伝播(電力伝送)に関する基本事項(2) 電力伝送手段(回路)の基本形

- (1) 同軸ケーブル
- (2) 二本の平行導線(レッヘル線)
- (3) 中空の管(導波管)
- (4) 誘電体で被服された導線など

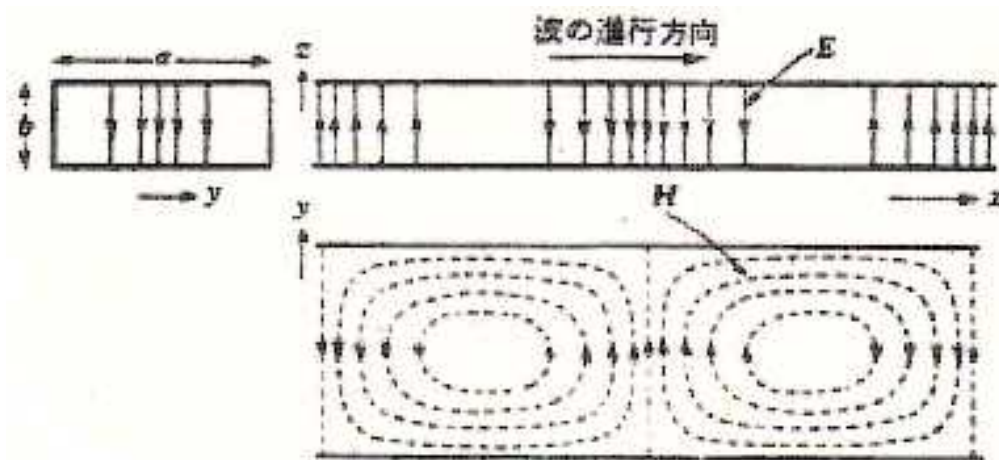


線路内の電流

(a) 同軸線路 (不平衡型)



(b) レッヘル線 (平衡型)



長方形導波管の H_{10} モードの電磁場。
実線は電場, 破線は磁場を示す。

電磁波の伝播(電力伝送)に関する基本事項(3) 同軸ケーブル内部の電磁界分布

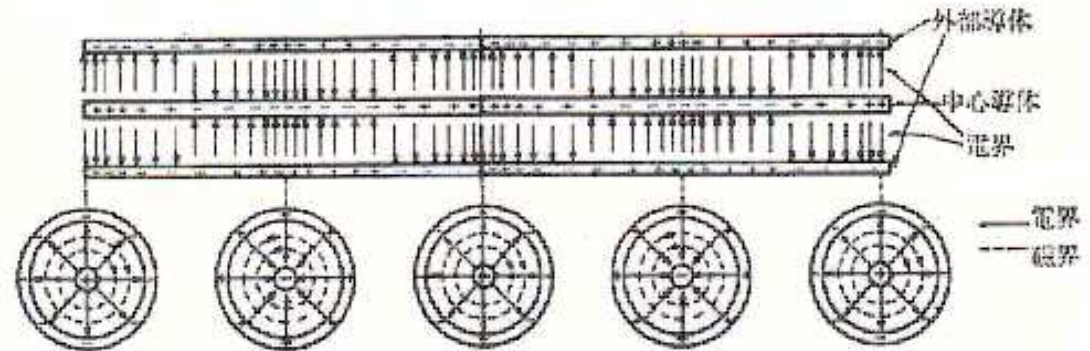
● 同軸ケーブル



● 電圧分布



● 電磁界分布



電磁波の伝播(電力伝送)に関する基本事項(4) 平衡伝送路と不平衡伝送路

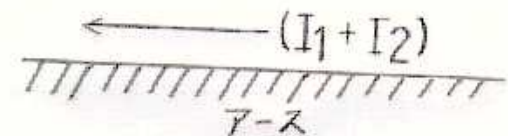
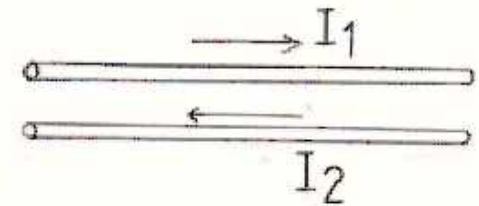
【平衡伝送路】

- 2本の導体からなる電力伝送回路において、両線を往路と帰路として流れる電流の振幅が等しく、位相が180度異なるような伝送形態

【不平衡伝送路】

- 2本の導体からなる電力伝送回路において、その両線の電位が等しく、両線を往路とし、アース(大地)を帰路とする伝送形態

電力伝送線路(伝送形態)

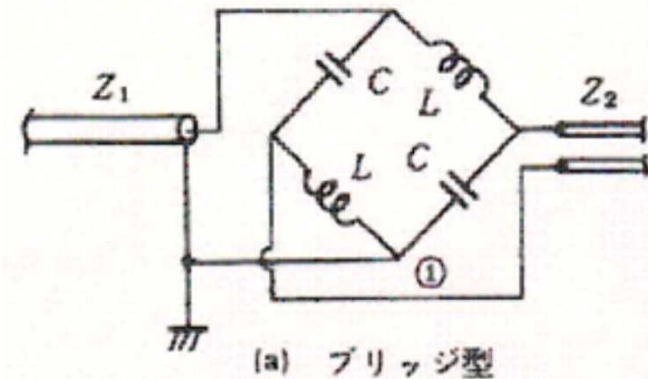
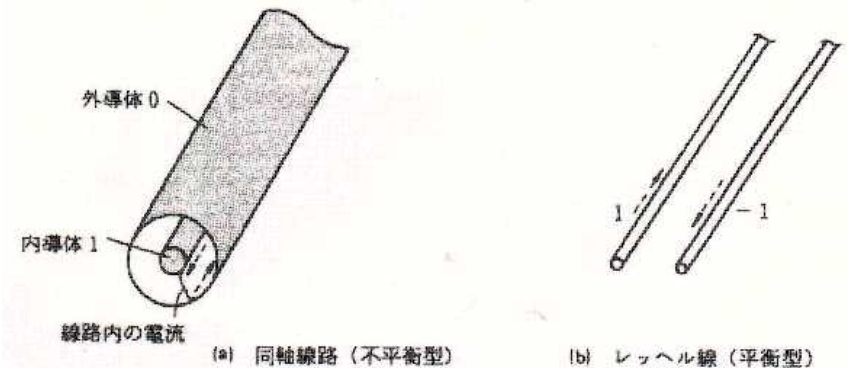


電磁波の伝播(電力伝送)に関する基本事項(5) 不平衡伝送路と平衡伝送路の接続

●同軸線路(不平衡伝送路)とレッヘル線(平衡伝送路)の接続・・・同軸線路とレッヘル線を接続すると、

電位的にバランスが取れず、電流的には同軸線路の外側に不要な電流(漏洩電流)が発生する。

●アンテナ工学分野では、同軸線路とレッヘル線を接続部に、 balan と呼ばれる装置が用いられる。



電磁波の伝播(電力伝送)の基本事項(6) 表皮効果

- 高周波電流が導体を流れる場合、導体内を流れない
- 高周波電流は、導体表面を流れる → この現象を表皮効果(skin effect)呼ぶ
- 表面効果の深さ $\delta = 1 / (\pi f \mu \sigma)^{1/2}$
f: 周波数、 μ : 透磁率(H/m) 、 σ : 導電率(S/m)

電磁波の伝播(電力伝送)の基本事項(7) 同軸ケーブルの電力損失を最小とする条件

●同軸ケーブルの特性インピーダンス:不整合

●誘電体にポリエチレンを用いる場合

$D/d=3.5$ (損失最小条件:経験則)

ϵ (比誘電率) $=2.3$

$$Z_0 = 138 / \sqrt{\epsilon} \cdot \log D/d$$

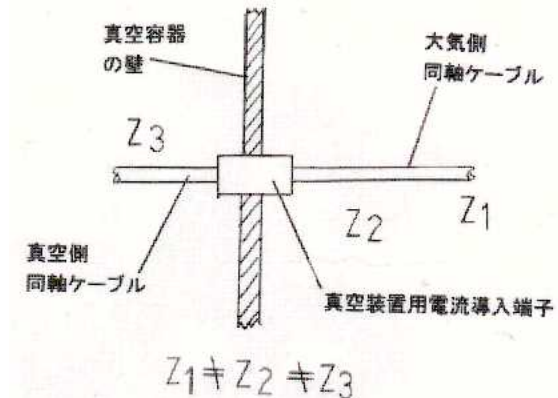
$$= 90 \times 0.544 = 49.5 \Omega$$

●誘電体にアルミナ($\epsilon=8.5$)を用いる場合

$$Z_0 = 138 / \sqrt{\epsilon} \cdot \log D/d$$

$$= 47.34 \times 0.544$$

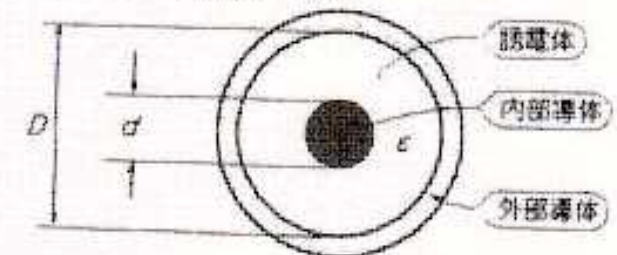
$$= 25.7 \Omega$$



特性インピーダンスを求める式

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \log_{10} \frac{D}{d} \dots \dots (1)$$

ここで ϵ : 比誘電率 (ポリエチレンは2.3)
 D : 外部導体内径
 d : 内部導体内径



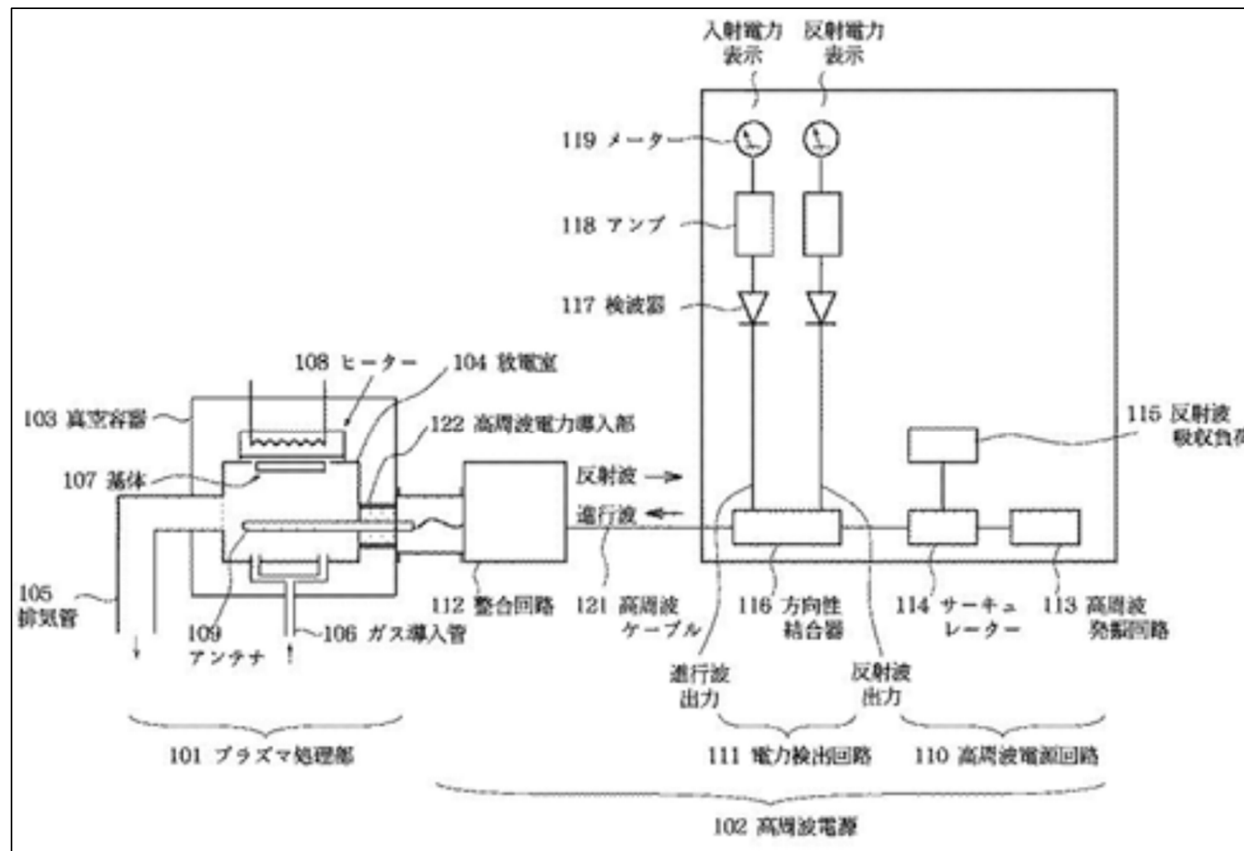
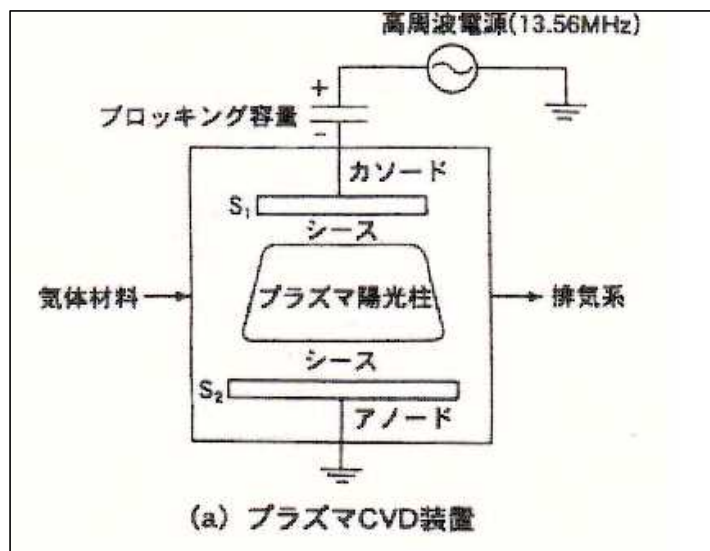
電磁波の伝播(電力伝送)の基本事項(8)
電力供給装置における電力損失の主たる要因

- (1) 一般的に、導体損失は、周波数が高い場合、大(表皮効果)
- (2) 一般的に、誘電体損失は、周波数が高い場合、大
- (3) 電源供給装置内部(電気回路)における導体損失・誘電体損失は、周波数が高い場合、大
- (4) 同軸ケーブル接続部における接触抵抗は、周波数が高い場合、大
- (5) 大気側同軸ケーブル・電流導入端子・真空側同ケーブルの特性インピーダンスの不整合による反射波の発生は、周波数が高い場合、大
- (6) 電極と同軸ケーブル接続部における異常放電は、高い場合、大
- (7) 同軸ケーブルでの電力損失は、ケーブル長さに比例

プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／電力供給系(整合器)

整合器(Matching Box)

高周波電源の出力を
電極に効率良く、供給するために用いられる



(出典) 藤岡靖ほか、プラズマ処理装置及びプラズマ処理方法、
特開2000-31073／特許3544136

プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／電力供給系

「平行平板型電極を用いた高周波プラズマCVD装置」電力損失の内訳概要・・・文献事例

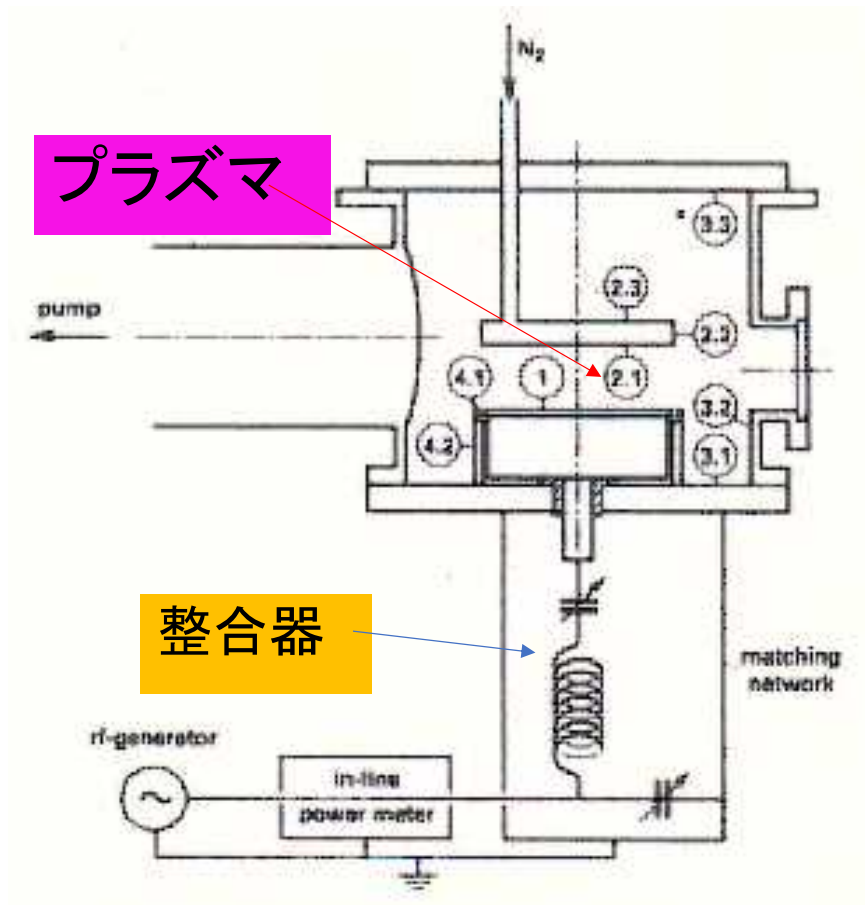
(出典) J.A.G. Baggerman et al: Power dissipation Measurements in a low-pressure N₂ radio-frequency discharge, J.Appl.Phys.76(2),15 July 1994, 738- 746

●電力損失の内訳データ

(1) 電源出力300W ⇒ **真空容器内部の放電での消費: 191.4W(約64%)**、マッチング回路での消費: 35.6W(約12%)、インピーダンス整合誤差による消費: 44W(約15%)、伝送回路接続部品などでの消費: 29W(約10%)

(2) 真空容器内部の放電での消費191.4W(約64%)の内訳 ⇒ **電極間での消費: 156W**(それ以外の35.4Wは、真空容器壁等で消費) ⇒ 156W/300W=約52%

電極間のプラズマ生成に消費される電力は、**供給電力の約52%**



プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／電力供給系

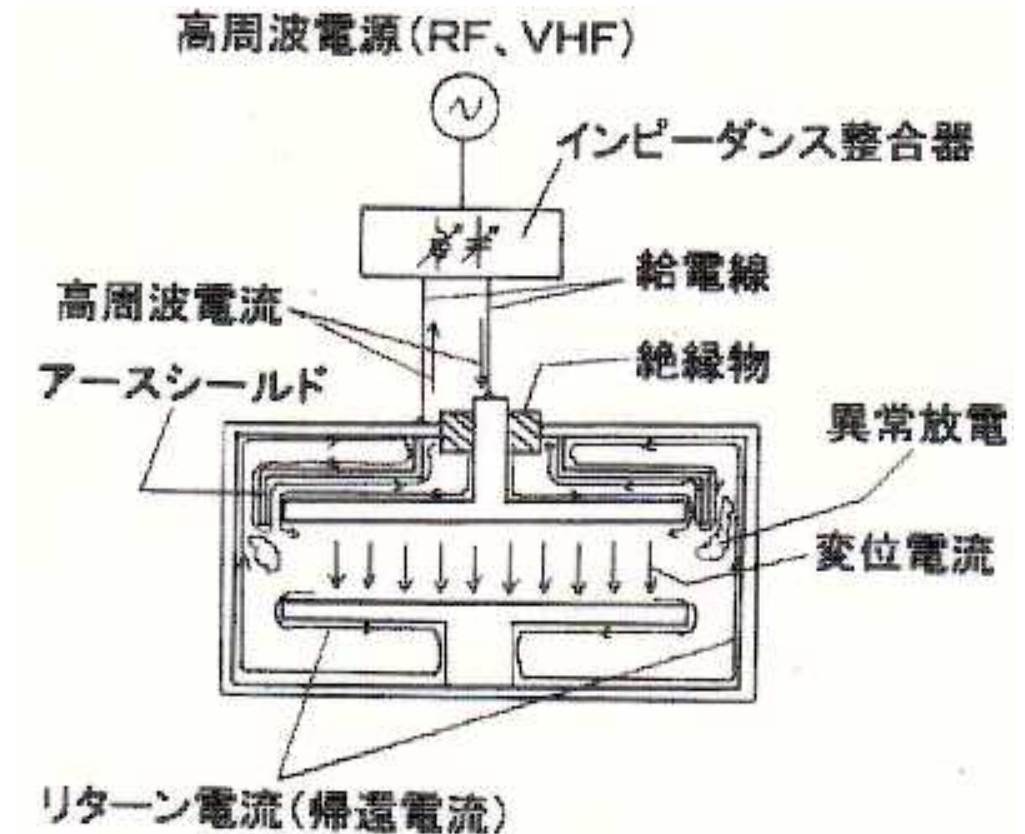
平行平板型電極での電磁エネルギー(高周波電流)の流れ／アースシールド付き電極

高周波特有の現象(表皮効果)により、導体表面を流れる

電力は、「**ポインティングベクトル $E \times H$** (電磁波)」で伝搬する。

問題の所在：
給電点の位置、給電手段に問題がある。

【出典】村田正義作成資料



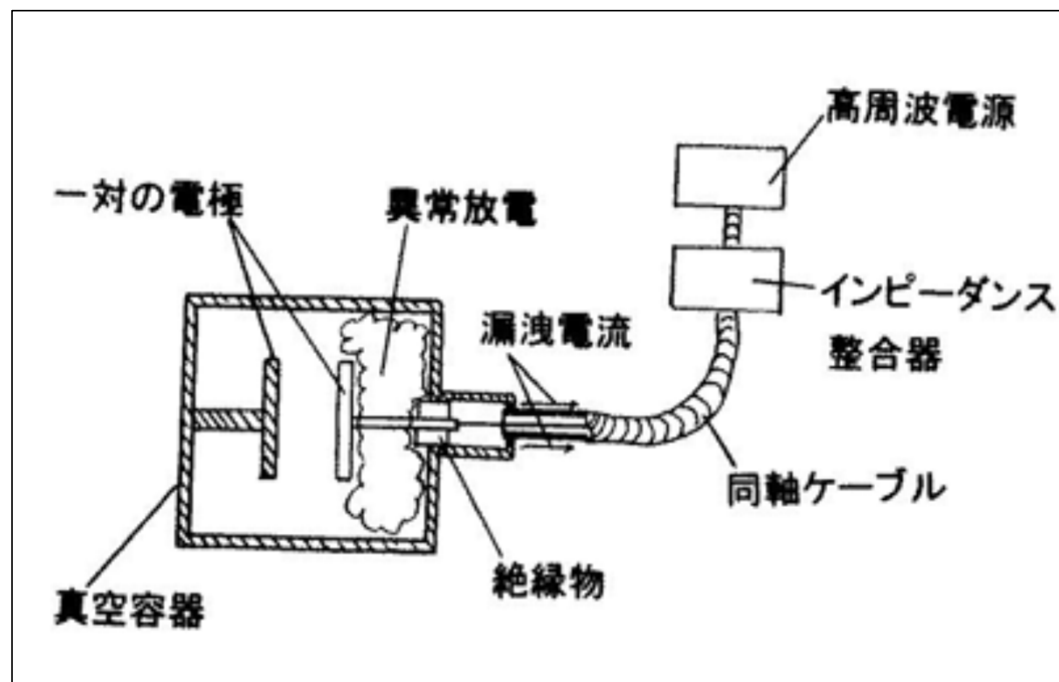
プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／漏洩電流

従来装置の課題：漏洩電流が発生し、反応室壁等で異常放電が発生。

電極と同軸ケーブルとの接続部において、同軸ケーブルと負荷である電極との伝送特性の違いに起因する漏洩電流が同軸ケーブルの外部導体の端面に発生する。

即ち、同軸ケーブルは不平衡型の伝送路であるが、負荷である電極は2本の平行線路(平衡型)に相当する特性を有している。

その結果、漏洩電流が発生する。



【出典】村田正義、特開2004-235673／特許3590955

「平行平板型電極を用いた高周波プラズマCVD装置」が抱える電気系に関する問題の具体例・・・漏洩電流問題／特許文献事例1

●課題：高周波漏洩電流の伝播路の改善。

電極周りの支持金具やベローズ等で異常放電が発生し、プラズマ漏れが発生。

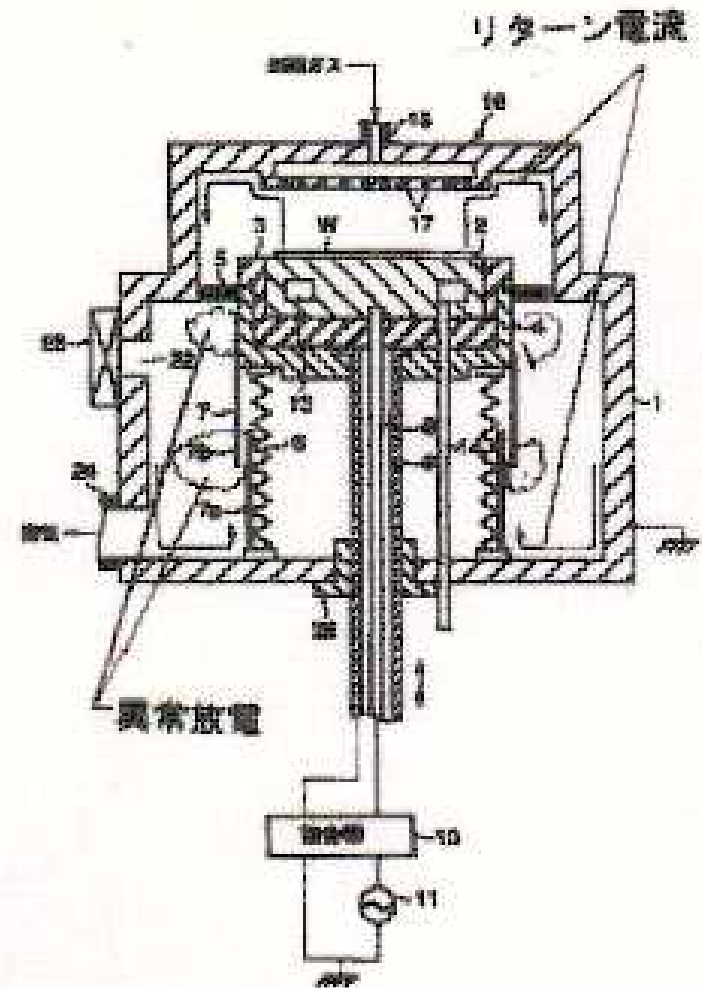
異常放電の抑制策が必要。

●解決策：電極から電源へ戻るリターン電流回路のインピーダンスを調整するインピーダンス調整手段を具備したことを特徴とする。

【出典】久保田和宏ほか

(東京エレクトロン、半導体先端テクノロジーズ)

特開2000-286235

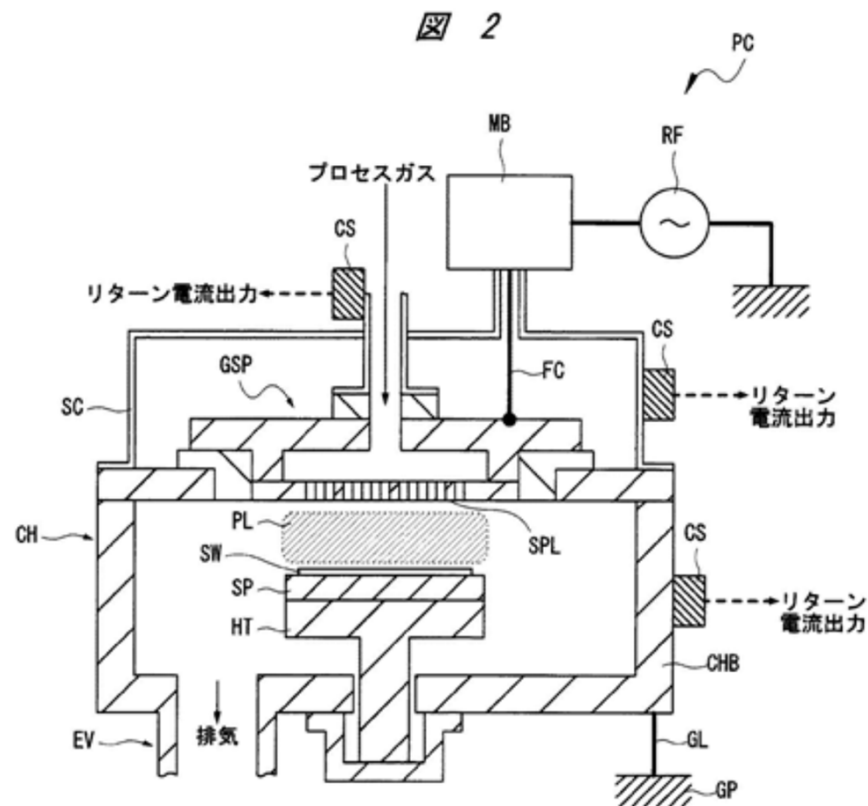


「平行平板型電極を用いた高周波プラズマCVD装置」が抱える電気系に関する問題の具体例・・・漏洩電流問題／特許文献事例2

課題：高周波漏洩電流対策

解決策：チャンバCHの外壁部CHBの外側表面、または電極RFEおよびシャワープレートSPLを覆うシールドカバーSCの外側表面に電流センサCSを取り付ける。

チャンバCHの外壁部CHBの外側表面またはシールドカバーSCの外側表面に流れる表面電流(リターン電流)を常時モニタすることにより、プラズマCVD装置PCの異常を検知する。



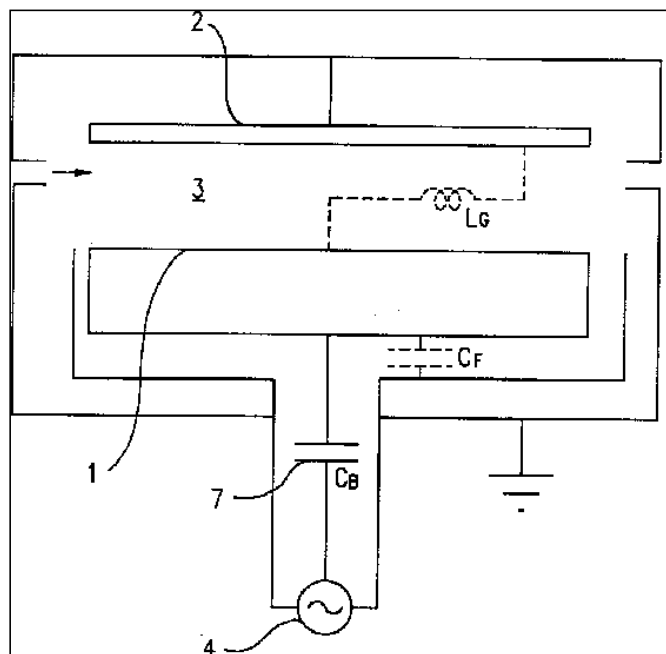
【出典】藤井一行他(ルネサスエレクトロニクス)、特開2014-107395

平行平板型プラズマCVD装置でのVHFプラズマ実験

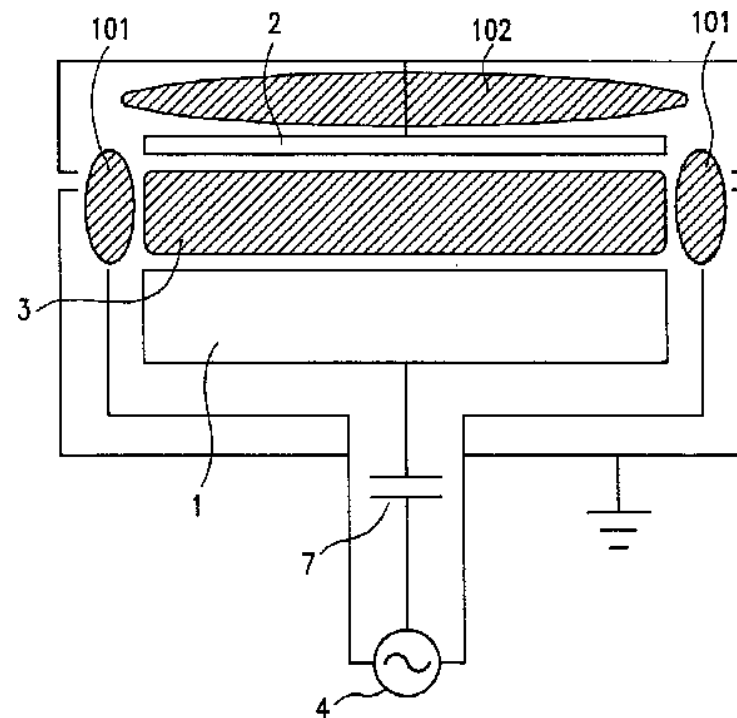
【出典】酒井道ほか(シャープ):

電子デバイス製造装置、特許第3238082号、特願平8-305359(出願日1996. 11. 15)

装置構成



異常放電の状況



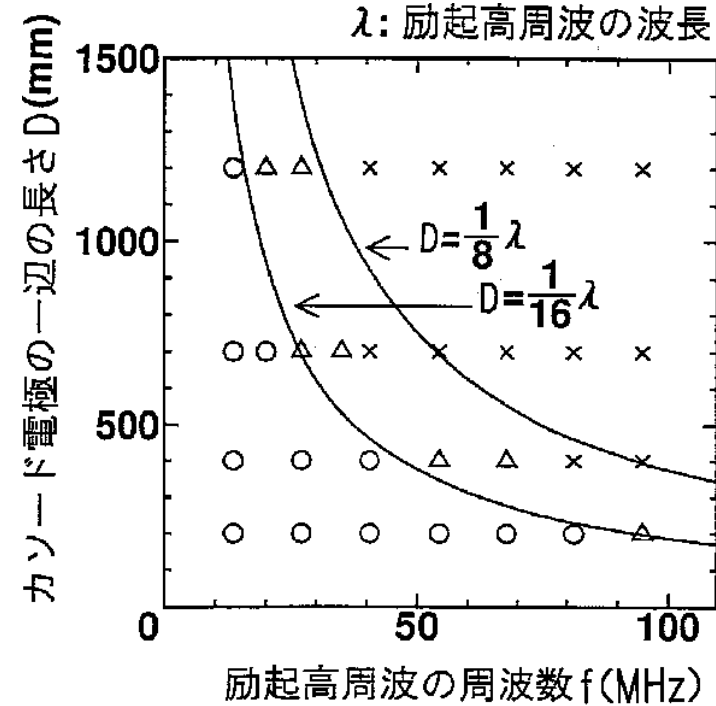
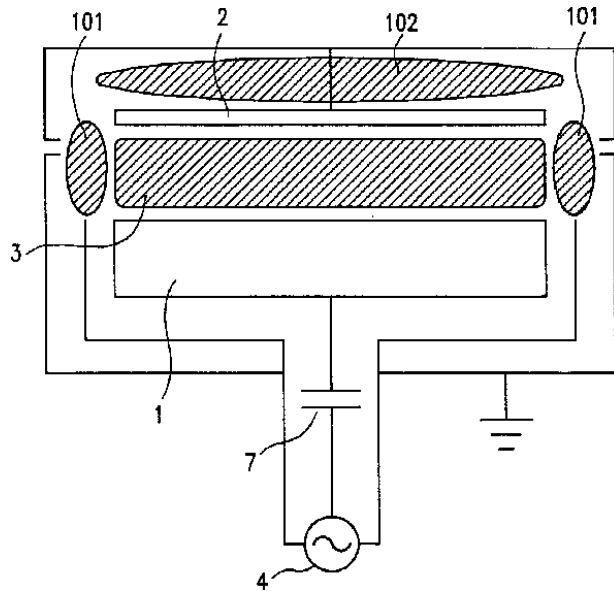
平行平板型プラズマCVD装置でのVHFプラズマ実験

【出典】酒井道ほか(シャープ):

電子デバイス製造装置、特許第3238082号、特願平8-305359(出願日1996. 11. 15)

VHFプラズマ大面積化の困難性

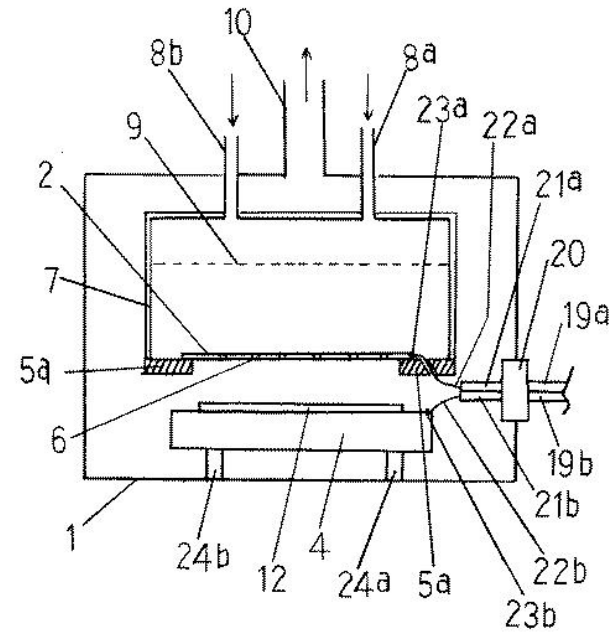
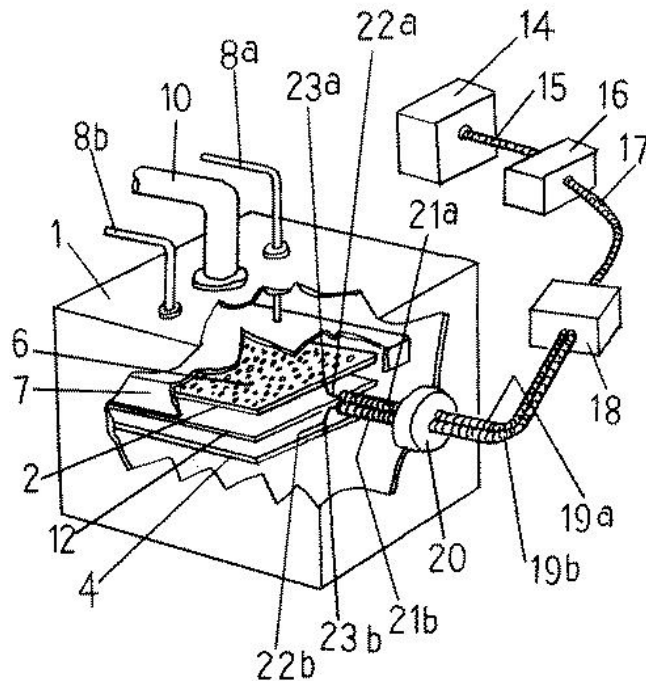
異常放電の状況



- 正常な電極間放電のみ
- △ 電極間放電+異常箇所放電
- × 異常箇所放電のみ

プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／給電手段の改善

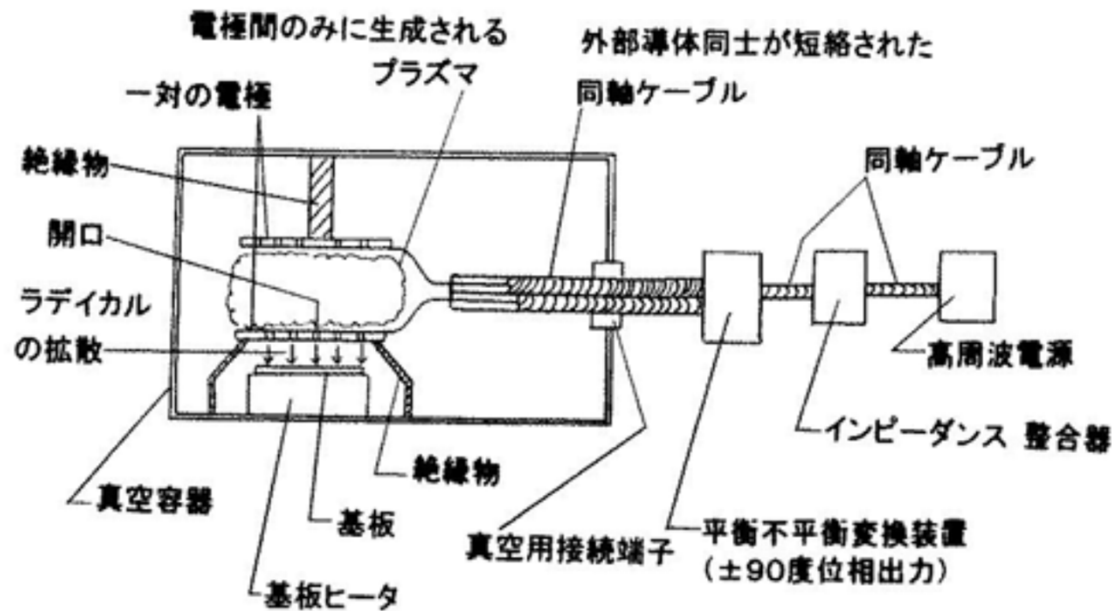
外部導体同士が接続された2本の同軸ケーブルと、平衡不平衡変換装置(balan)を用いて給電する



【出典】村田正義、特開2004-235673／特許3590955

プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／給電手段の改善

外部導体同士が接続された2本の同軸ケーブルと、平衡不平衡変換装置(balan)を用いて給電する



【出典】村田正義、特開2004-235673／特許3590955

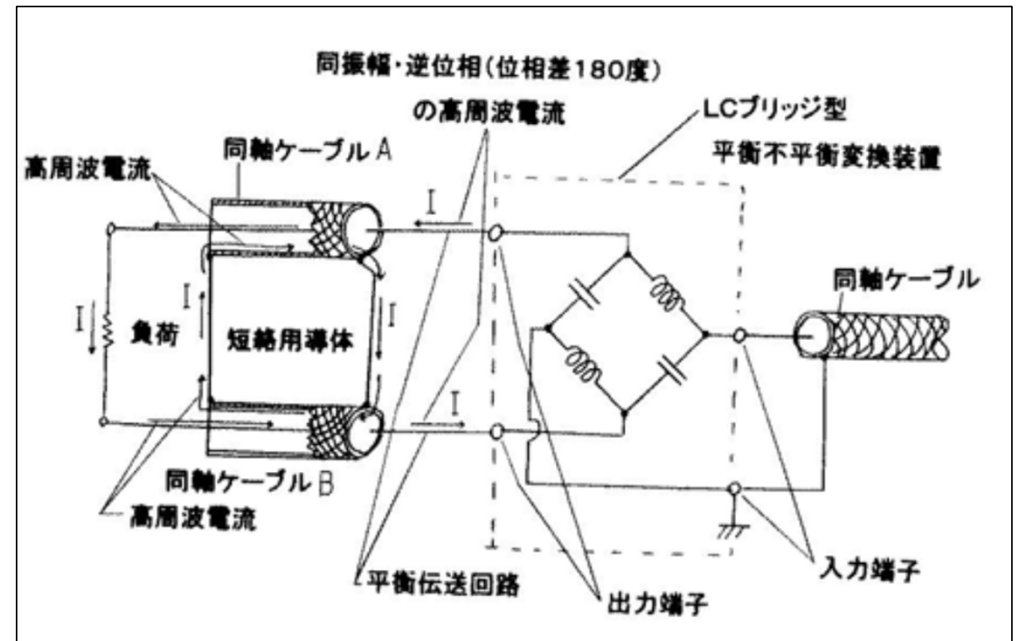
プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／給電手段の改善

略同じ長さの2本の同軸ケーブルの端部を接続する。

上記外部導体同士が短絡された2本の同軸ケーブルの外部導体の内側を流れる高周波電流は、

図に示すように、該外部導体同士が閉ループ回路を形成しているため、上流側(LCブリッジ型平衡不平衡変換装置の出力端子側)及び下流側(一対の電極側)への電流の漏洩はない。

また、該LCブリッジ型平衡不平衡変換装置の出力端子から出力される電流は同振幅で逆位相となっている。



【出典】村田正義、特開2004-235673／特許3590955

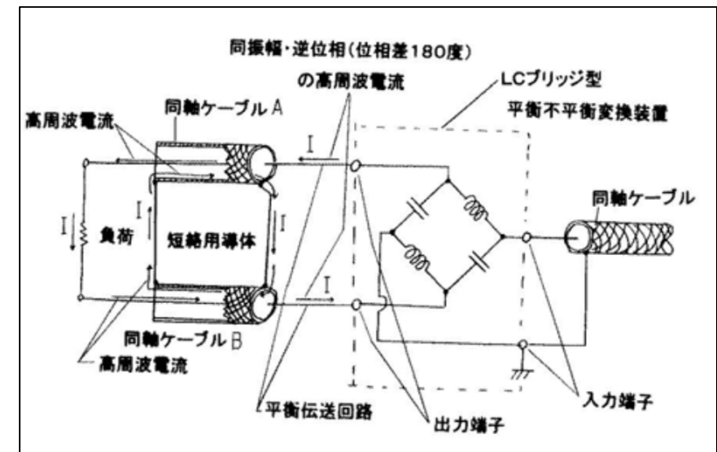
プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／給電手段の改善

即ち、上記外部導体同士が短絡された2本の同軸ケーブルは、電界・磁界を外部に放射することなく、それを閉じ込めた形で、かつ平衡伝送回路としての機能を有している。

その結果、

該一対の電極間に印加される電圧は交互に正負となるので、該電極間に掛かる電圧はアース(真空容器の壁及び金属部材など)との電位差よりも2倍も大きい。

したがって、一対の電極間のみにプラズマを優先して生成させることが可能となる。



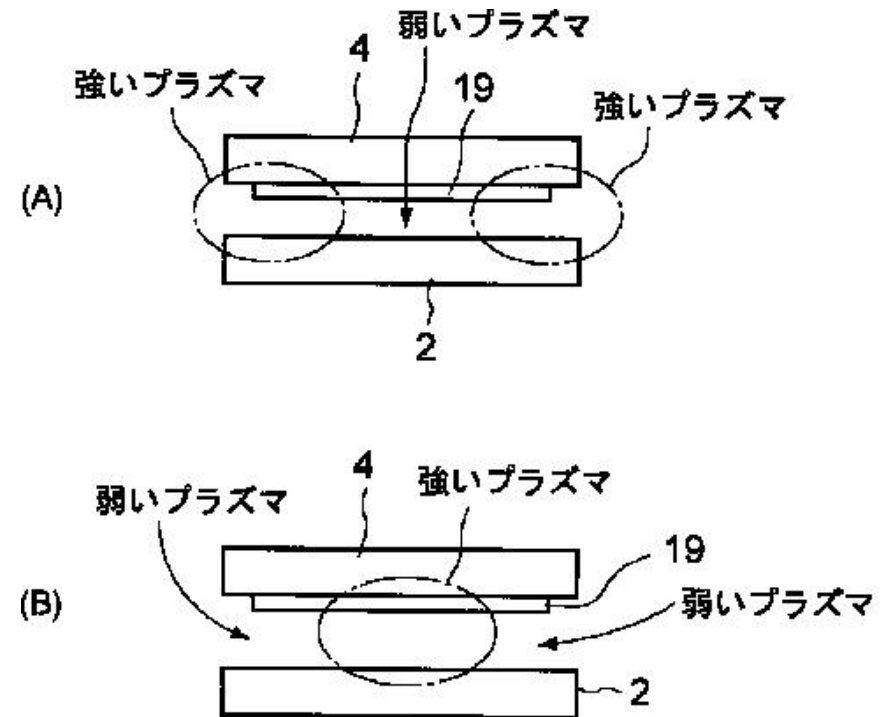
【出典】村田正義、特開2004-235673／特許3590955

プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／電極のエッジ効果(端面効果)

電極構成・・・平行平板型

電極端面近傍に強いプラズマが発生する

整合器でインピーダンス調整すると、
強い部分が電極中央へ移動する



【出典】三菱重工、特開2002-305151

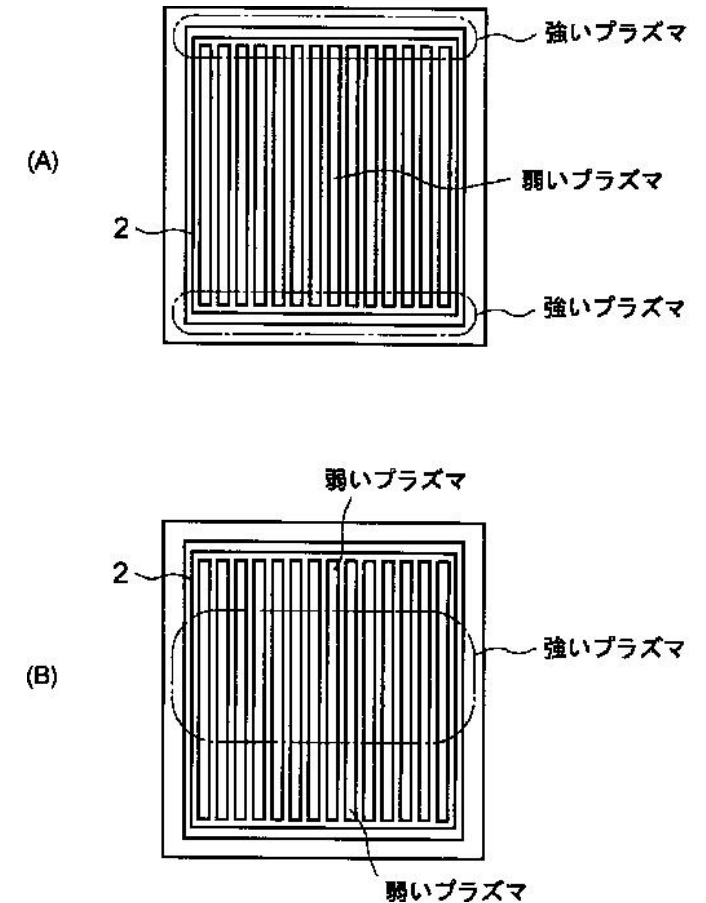
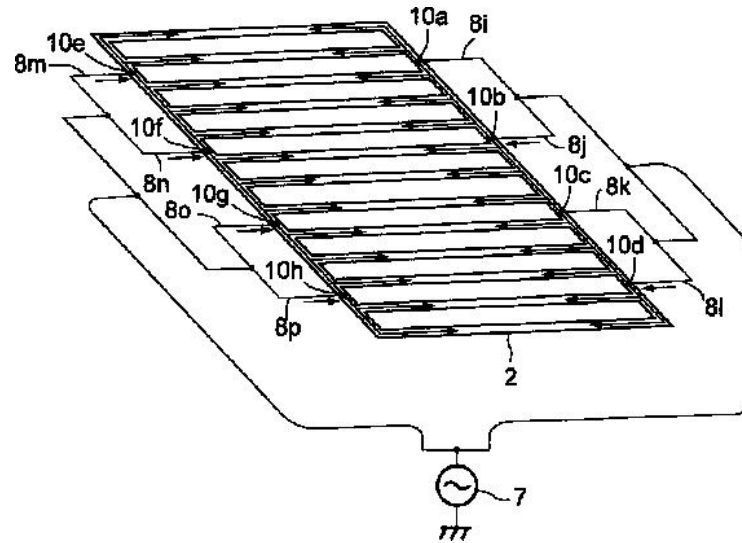
プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／電極のエッジ効果(端面効果)

電極構成・・・梯子型

電極端面近傍に強い
プラズマが発生する

整合器でインピーダンス
調整すると、

強い部分が電極中央
へ移動する



【出典】三菱重工、特開2002-305151

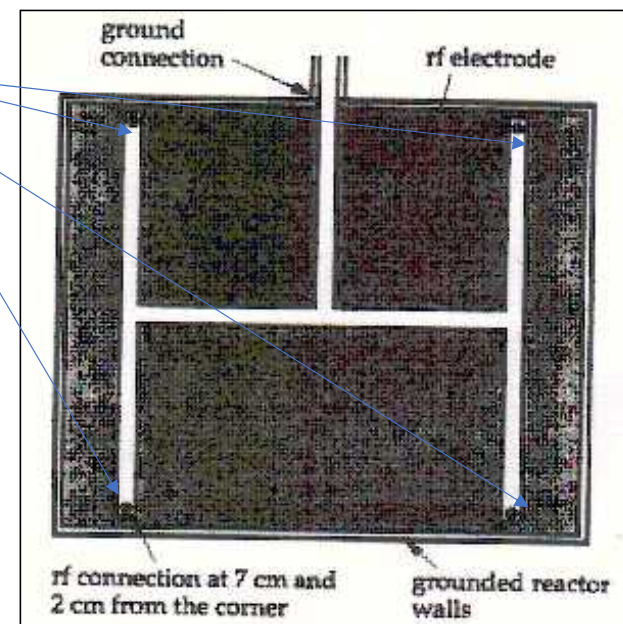
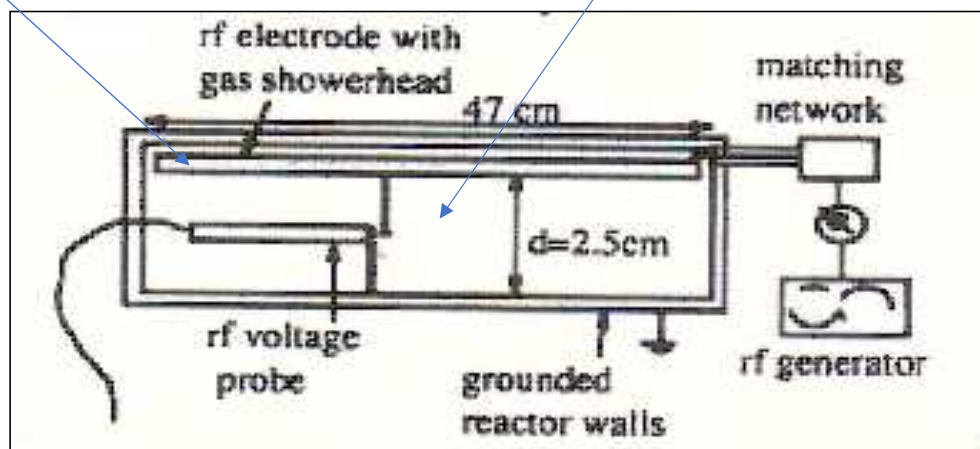
プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／定在波の発生

周波数70MHz、基板面積0.45m \times 0.35m、
膜厚分布:バラツキ \pm 18%

電極

プラズマ

給電点
4点



【出典】L. Sansonnens et al : Plasma Sources Sci. Technol. 6(1997) 170-178.

プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／定在波の発生

Arプラズマの発光強さの分布

⇔ 定在波が発生

発光状況を観察し、
発光強度分布を測定

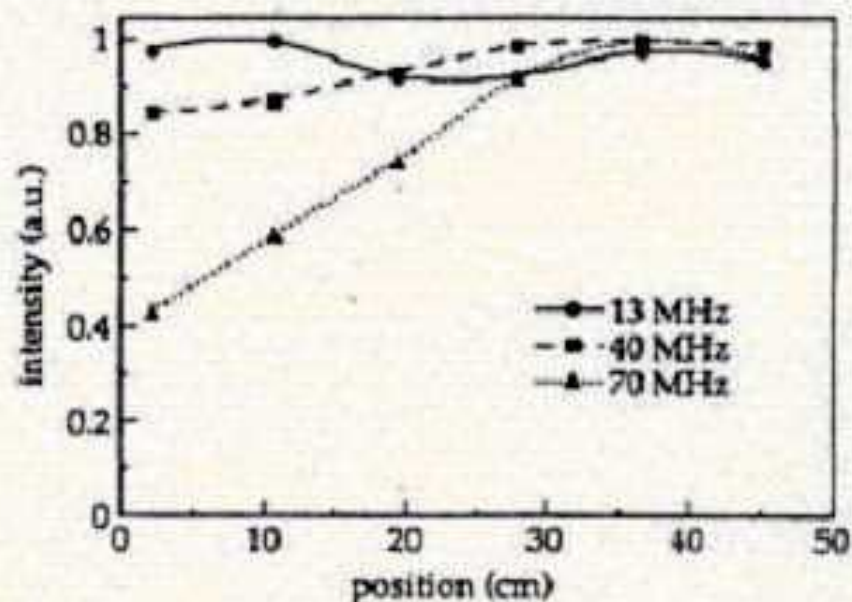


Figure 6. Emission intensity profile of an argon plasma (55 W RF power, 0.1 Torr pressure) across the front full-width window for three frequencies. The intensity is integrated across the electrode gap and normalized to the maximum intensity. The position 0 cm corresponds to the side of the reactor where the RF is connected.

【出典】L. Sansonnens et al : Plasma Sources Sci. Technol. 6(1997) 170-178.

プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／定在波の発生

プラズマの強さの空間的分布

電力＝ポインティングベクトル

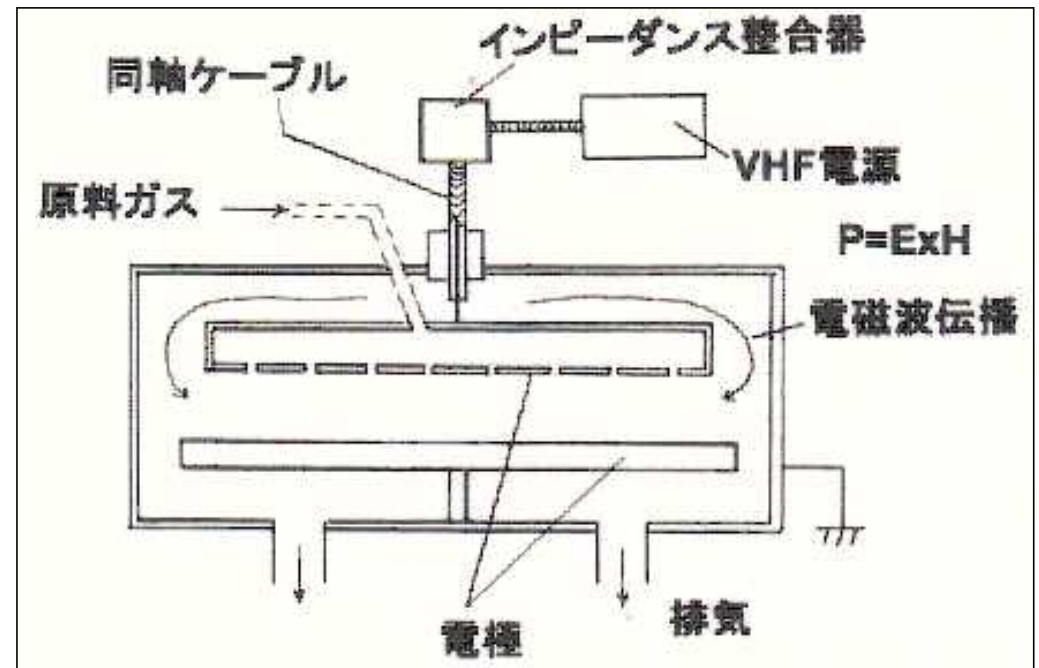
$$P = c\varepsilon (E_y)(E_y)$$

∝ 電場 (E_y) の二乗

- ・エネルギーは $E \times H$ 方向へ流れる(伝播する)

c : 電磁波伝播の速さ、

ε : 誘電率

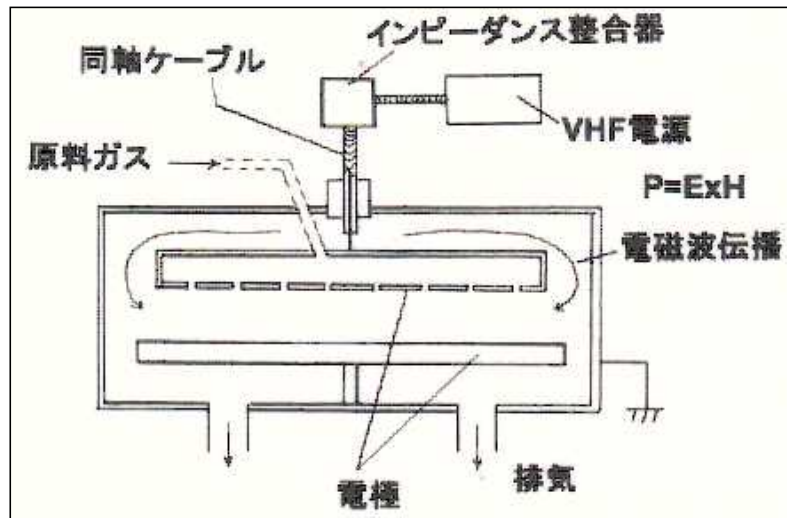


定在波の発生……電波の干渉

- M.A.Lieberman et al : Plasma Sources Sci. Technol.11(2002),283-293
- A. Perret et al : Applied Physics Letters, Vol. 83, No. 2(2003), 243-245

●Liebermanモデルによるシミュレーション結果及び実験結果

- ・電極：平行平板型
- ・給電点：電極裏側中央・1点



$$I = \cos^2(2\pi x / \lambda)$$

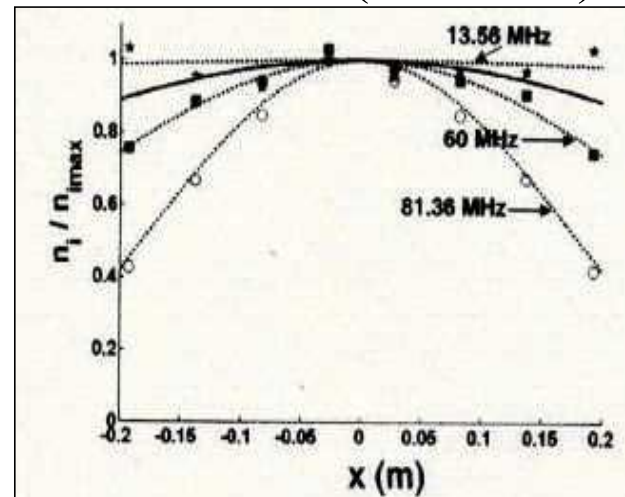
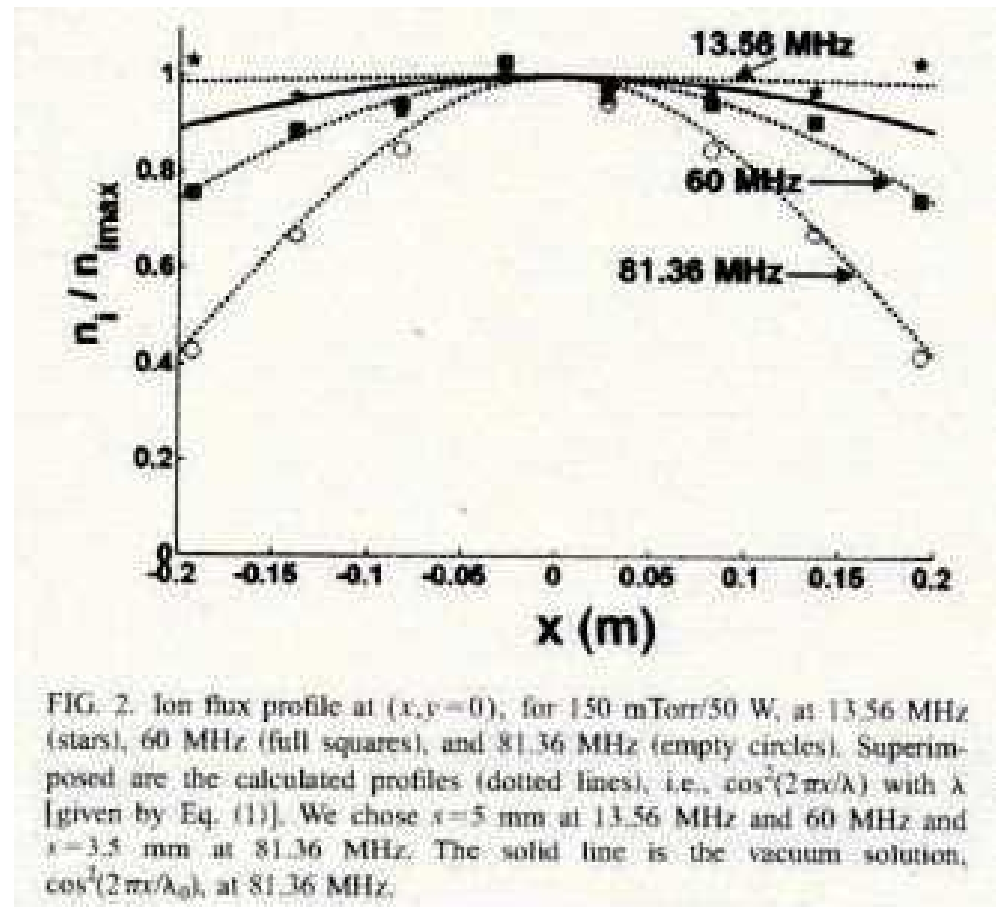
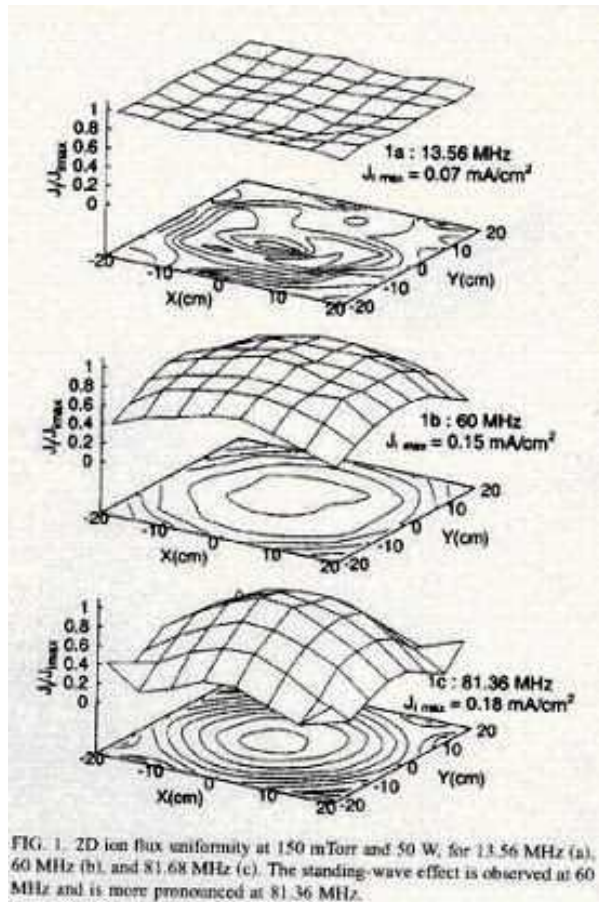


FIG. 2. Ion flux profile at $(x, y = 0)$, for 150 mTorr/50 W, at 13.56 MHz (stars), 60 MHz (full squares), and 81.36 MHz (empty circles). Superimposed are the calculated profiles (dotted lines), i.e., $\cos^2(2\pi x/\lambda)$ with λ [given by Eq. (1)]. We chose $s = 5$ mm at 13.56 MHz and 60 MHz and $s = 3.5$ mm at 81.36 MHz. The solid line is the vacuum solution, $\cos^2(2\pi x/\lambda_0)$, at 81.36 MHz.

平行平板電極内部の電圧分布 (A. Perret et al)
 - 13.56MHz、60MHz、81.36MHz



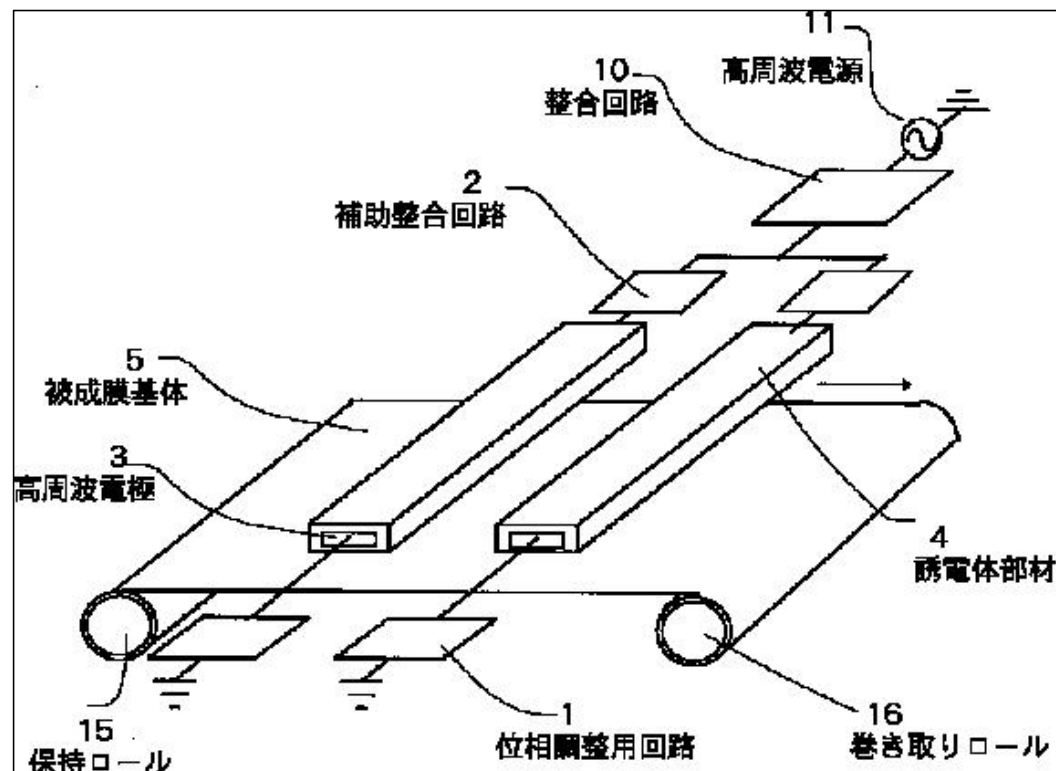
(出典) A. Perret et al : Applied Physics Letters, Vol.. 83, No. 2(2003), 243-245.

プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／プラズマの均一化(キャノン)

(出典)高木智、寺西康治(キャノン):特開平11-243062/特許3501668

プラズマ発生用電極の給電点の反対側の先端部分に反射電力の位相を調整する位相調整回路が接続されていることを特徴とする。

電源周波数は、60～300MHz。

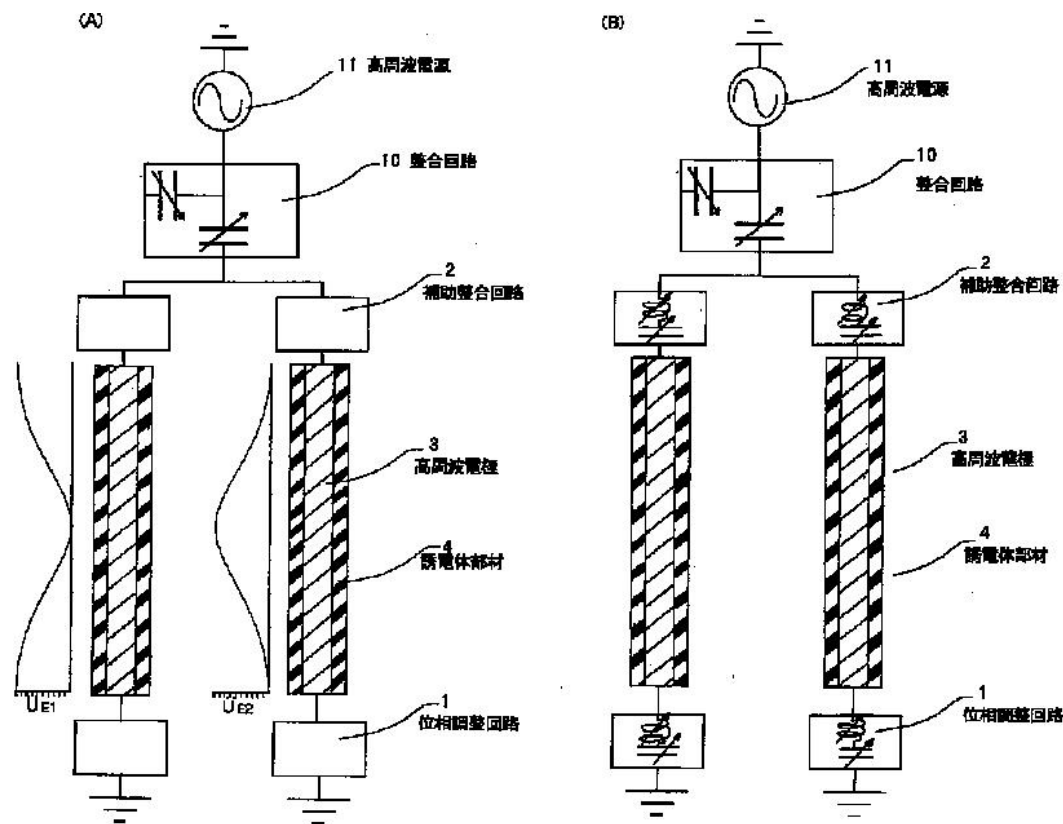


プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／プラズマの均一化(キャノン)

(出典)高木智、寺西康治(キャノン):特開平11-243062/特許3501668

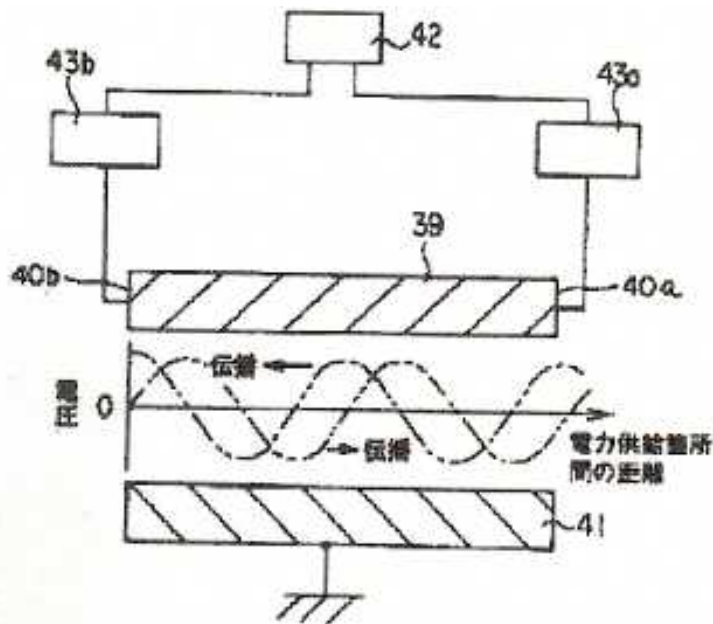
プラズマ発生用電極の給電点の反対側の先端部分に反射電力の位相を調整する位相調整回路が接続されていることを特徴とする。

電源周波数は、60～300MHz。

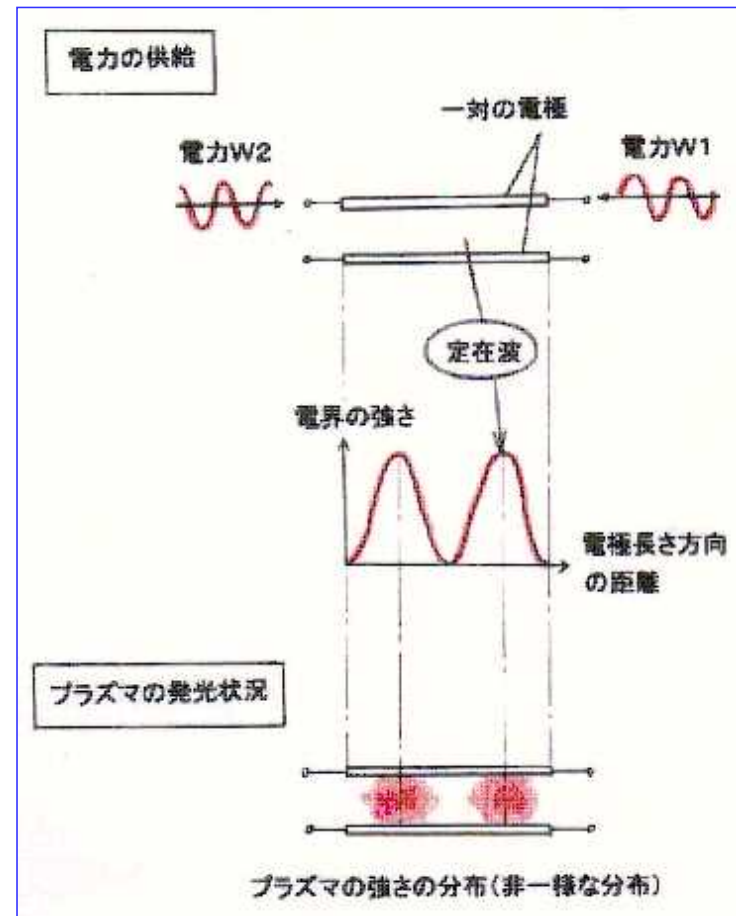


プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／プラズマの均一化(三菱重工)

(出典)山越英男ほか(三菱重工):特開2001-257098/特許3316490号



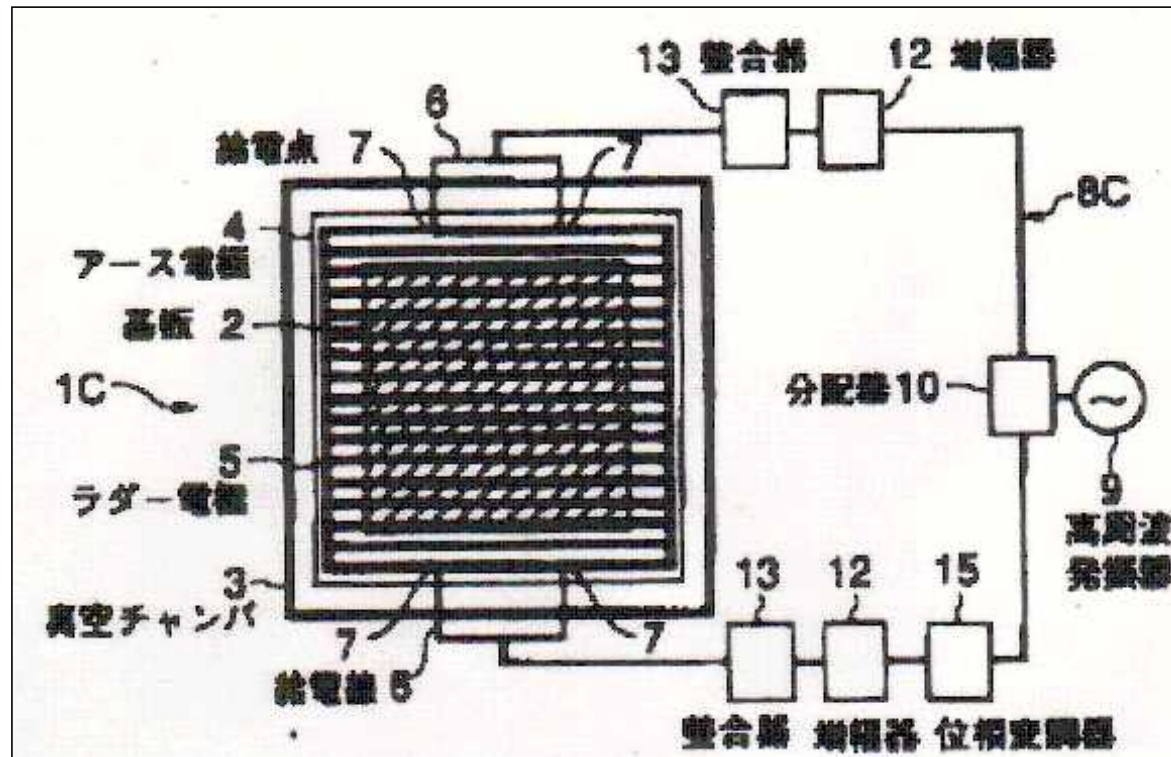
プラズマを電極面に平行方向に
変動させる⇒ 均一化



プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／プラズマの均一化(三菱重工)

(出典)山越英男ほか(三菱重工)、特許第3316490号

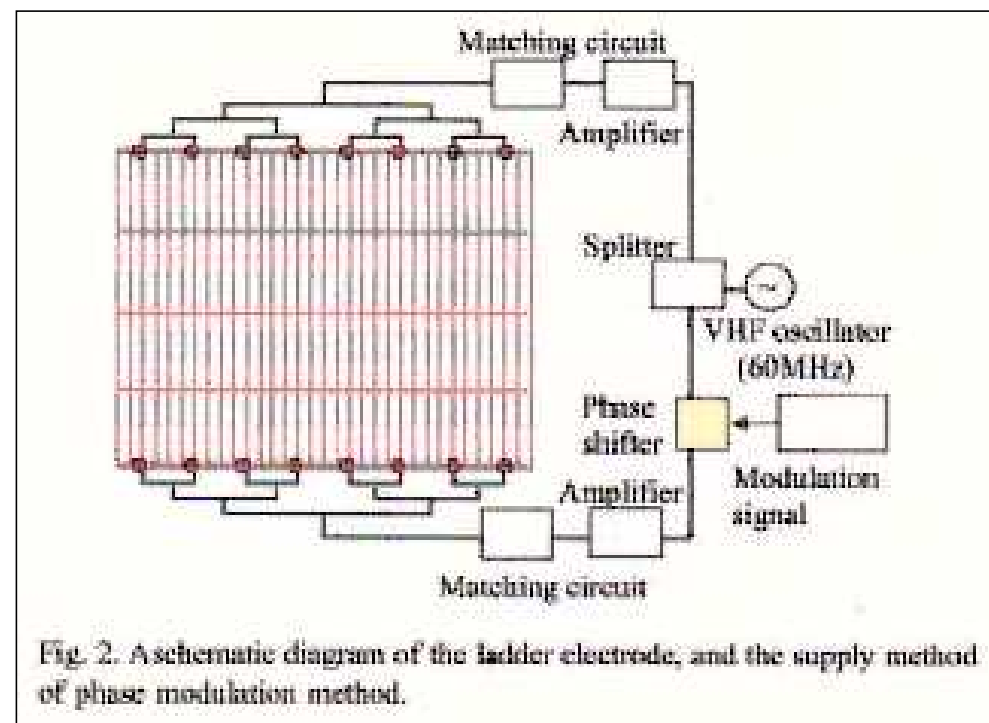
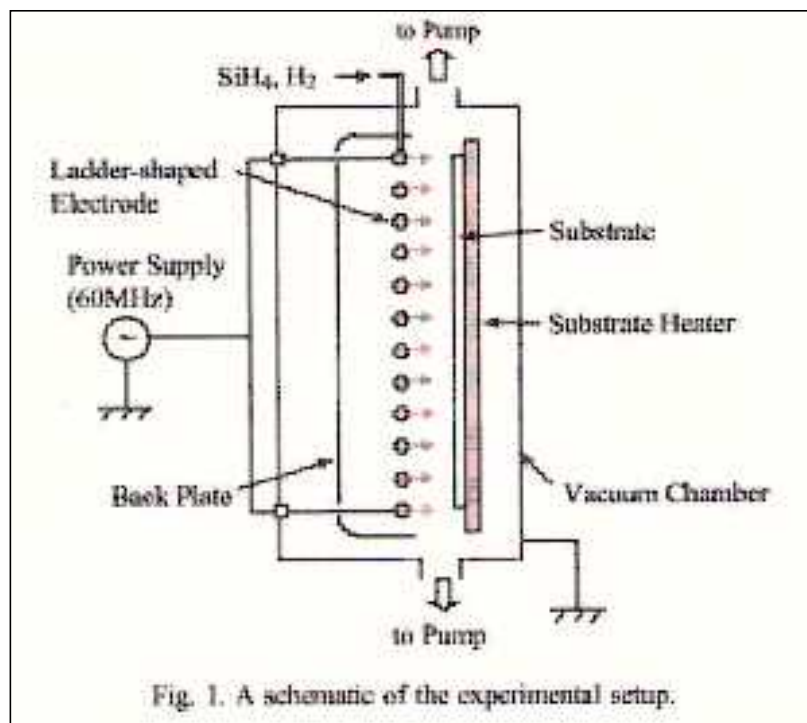
構成:発振器、分配器、位相変調器、増幅器、整合器、同軸ケーブル



ラダー型電極を用いたVHFプラズマCVD装置／プラズマの均一化(三菱重工)

(出典) H. Takatsuka et al : Thin Solid Films, 506-507(2006)13-16

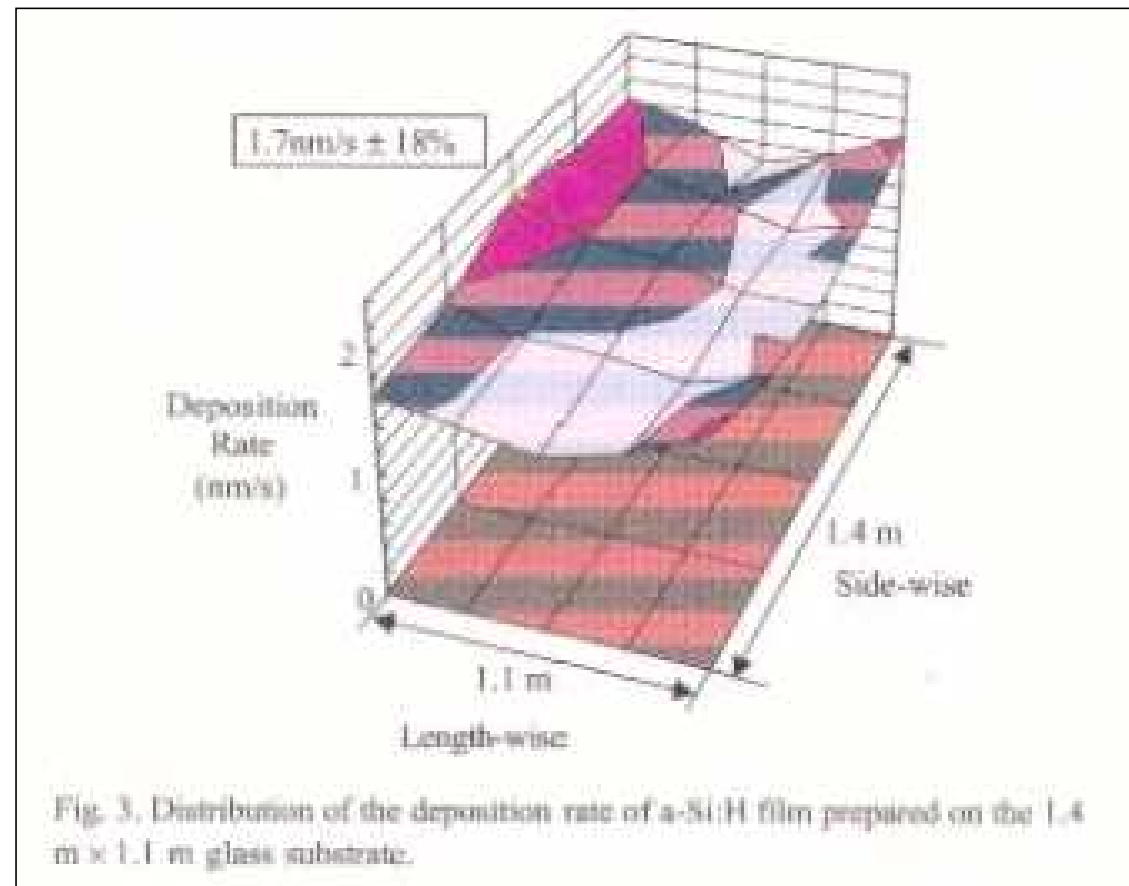
- 装置の特徴
- ①電極:ラダー型、②均一化:位相変調法、③基板同時処理枚数:1枚／1電極(1製膜室:2枚／2電極)



ラダー型電極を用いたVHFプラズマCVD装置／プラズマの均一化(三菱重工)

(出典)H.Takatsuka et al : Thin Solid Films,506-507(2006)13-16

- ・周波数60MHz、
- ・基板面積1.4m×1.1m、
- ・a-Si製膜速度1.7nm/s、
- ・膜厚分布バラツキ±18%

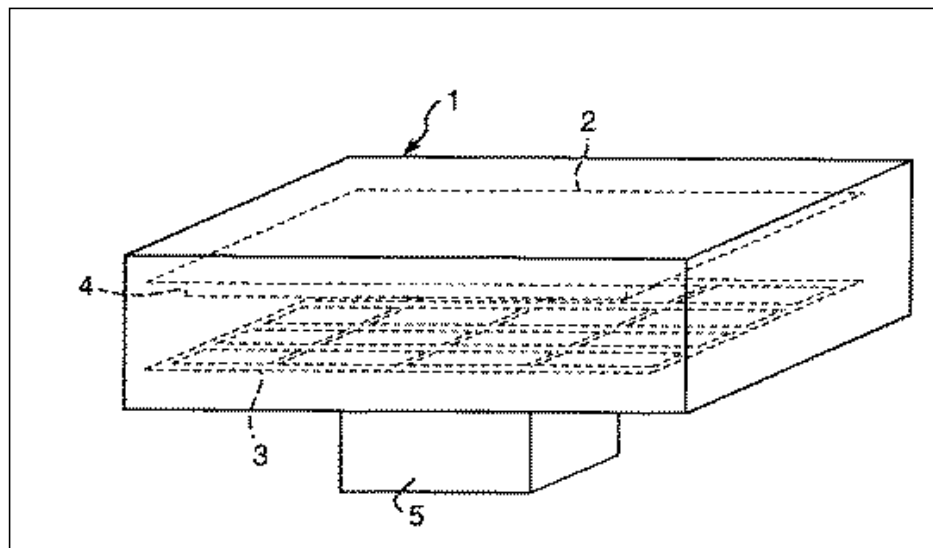
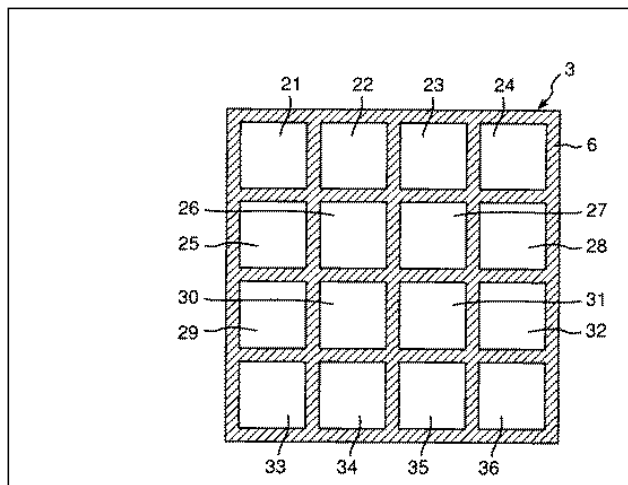


プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／プラズマの均一化(シャープ)

(出典)三宮仁(シャープ):特開2001-168044(H13.6.22)／特許3581813

特徴

- ・カソード電極を分割すること、
- ・上記分割カソード電極を順次パルス放電させて、製膜する方法
- ・上記分割カソード電極の空間的に離れた複数の分割カソード電極を順次パルス放電させて、製膜する方法



プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／プラズマの均一化(ULVAC)

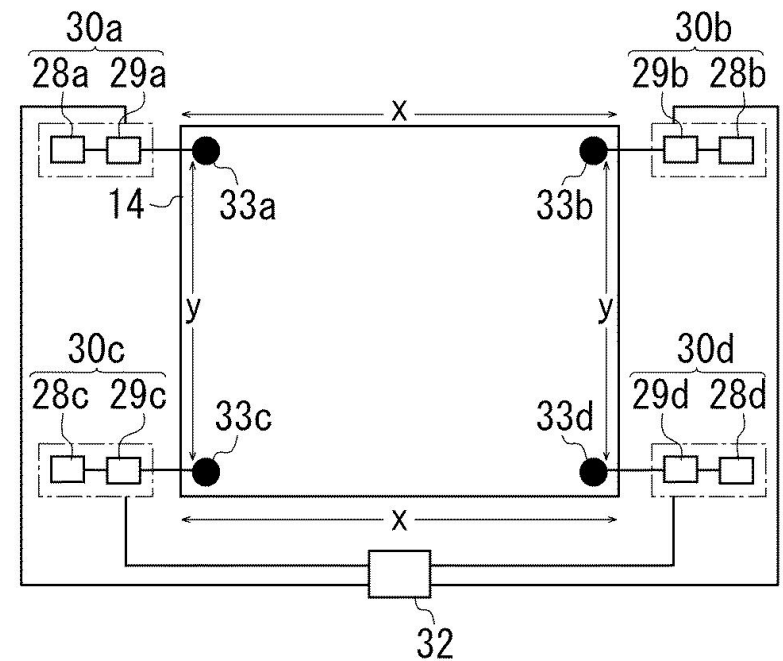
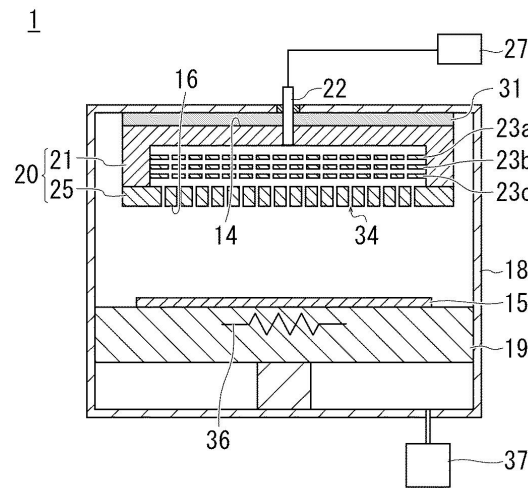
(出典)若松貞次ほか(ULVAC):特開2005-220368／特許4404303

複数の電源装置の出力電圧の位相を制御する、

給電点は電極中心から等距離で異なる位置。

各電源装置30a~30dは位相制御装置32によって同じ周波数であって、互いに位相がずらされた高周波電圧を出力している。

位相をずらすことで、電源装置30a~30dから投入される実効的な電圧が揃い、シャワーヘッド20と基板ホルダ19との間のプラズマ密度が均一になる



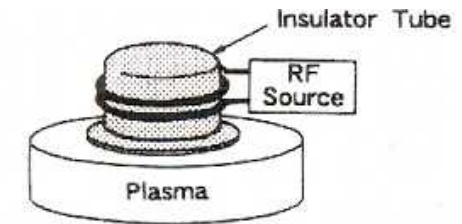
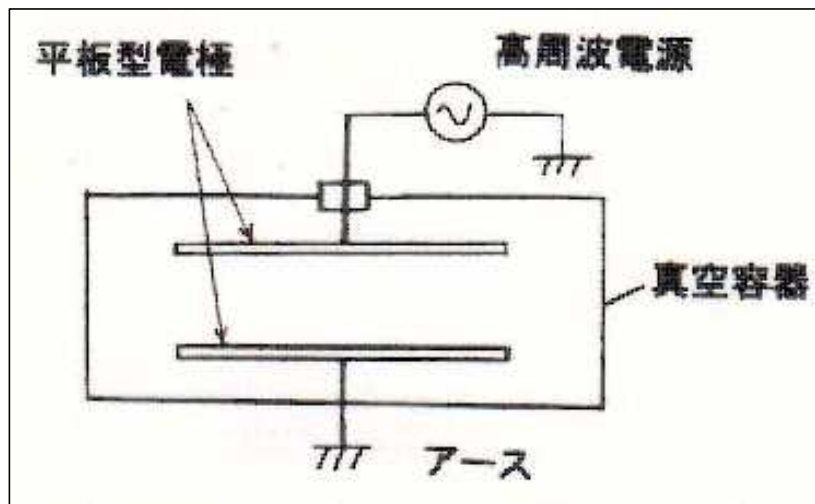
プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／電極の形状

コイル型(誘導結合型)

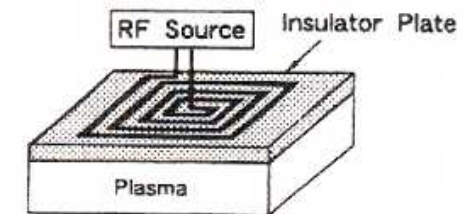
電子密度が高いことから、エッチングに用いられる

平板型(容量結合型)

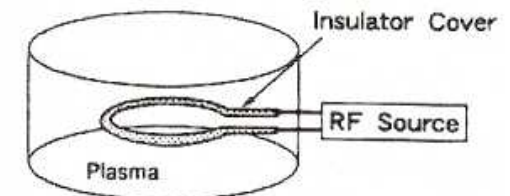
プラズマCVDに用いられる



(a) Helical Antenna



(b) Spiral Antenna

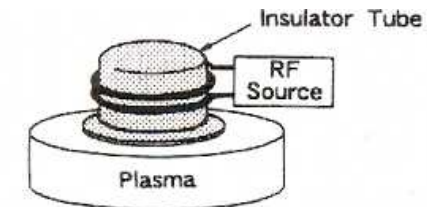
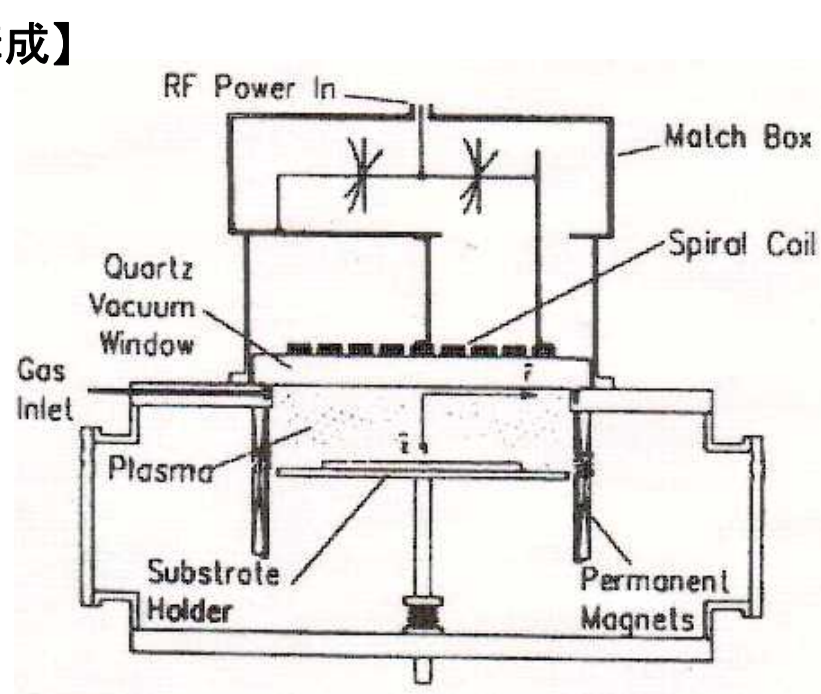


(c) Immersed Antenna

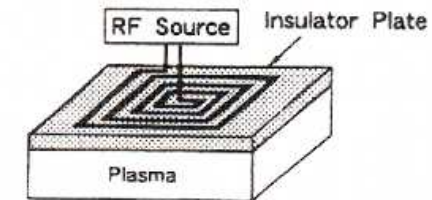
高密度プラズマ生成／誘導結合(ICP)型

- ・SUS製真空容器(矩形、円形)+コイル型電極
- ・アンテナ(コイル)を流れる電流により発生する電界による放電

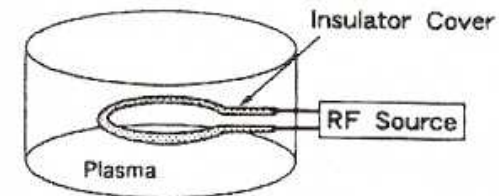
【装置構成】



(a) Helical Antenna



(b) Spiral Antenna



(c) Immersed Antenna

(出典)・J.Hopwood: Plasma Sources Sci. Technol. 1(1992), 109-116.

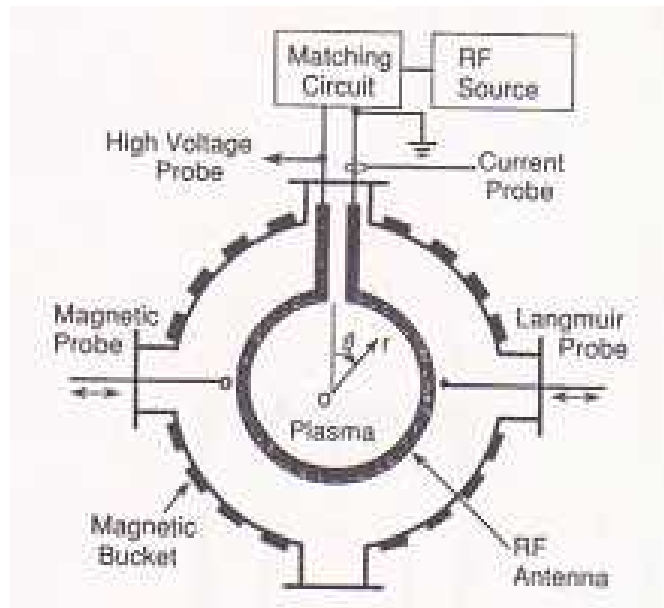
・菅井秀郎: 応用物理、第63巻、第6号(1994)、559-567.

アンテナ電極の特徴

(出典) H. Sugai et al: Jpn.J.Appl.Phys. Vol.33(1994),2189-2193

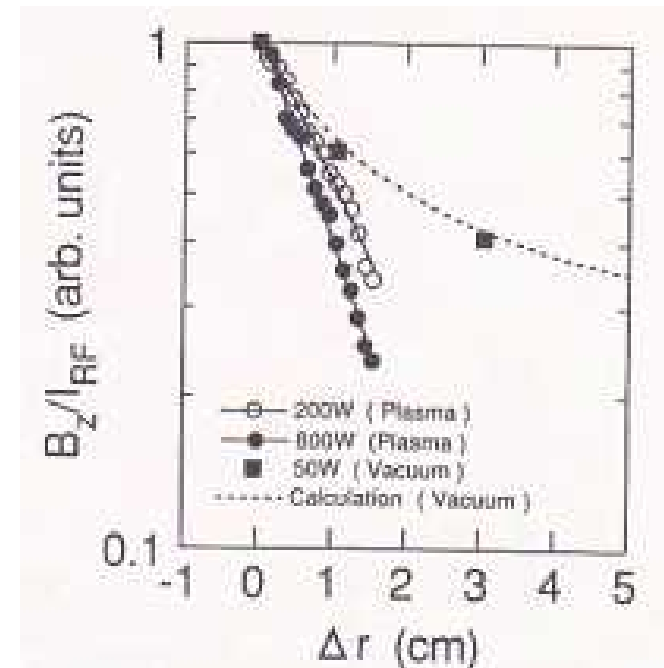
【実験装置】

- ・真空容器: 直径36cm x 高さ47cm
- ・ループアンテナの外径11cm
- ・構成部材= 外径12mm (絶縁膜付)



【磁場の強さの分布】

- ・アンテナ表面から離れると、急激に弱くなる
- ・アンテナ電極で生成されるプラズマはアンテナ近傍で強く、離れると急激に弱くなる



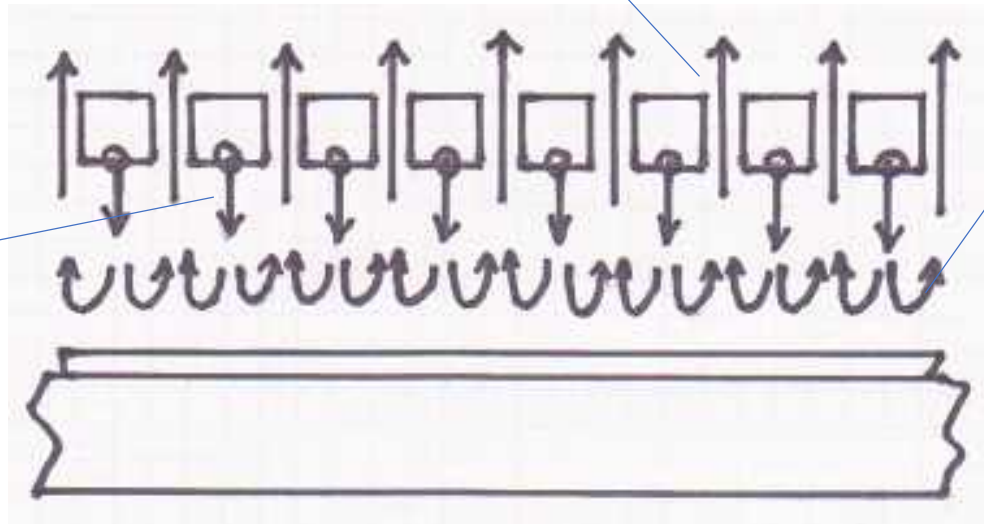
プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／原料ガスの供給・排出手段

理想的なガスの流れ

原料ガスの供給

排出

ガス&ラジカルの
流れ



プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／原料ガスの供給・排出手段

原料ガスの供給・排出手段の改善に関する典型例

- Reinberg型／平行平板電極
- Sherman型／平行平板電極

- ガスの流れと拡散に関する改良例

Reinberg型／平行平板電極

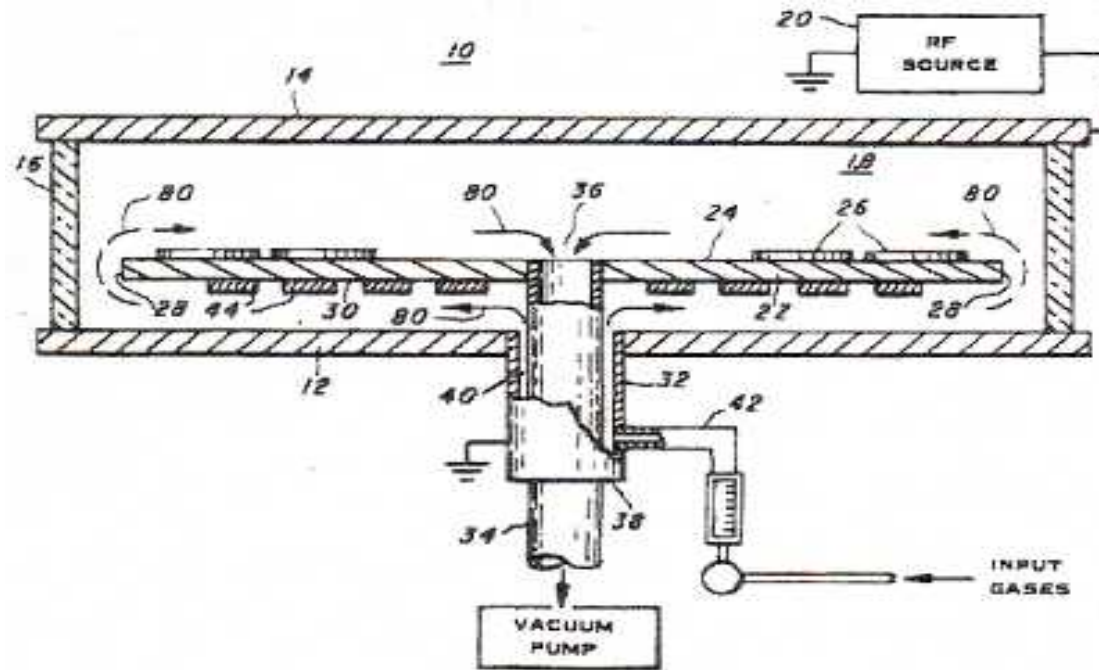
Alann R. Reinberg(Texas Instruments) ・USA Patent 3,757,733(出願日1971. 10. 27、特許登録1973. 9. 11)

・誘導コイル型プラズマ装置における問題点
(膜の不均一性)を解消するために、容量結合型プラズマ装置を提案

・ガス流れ

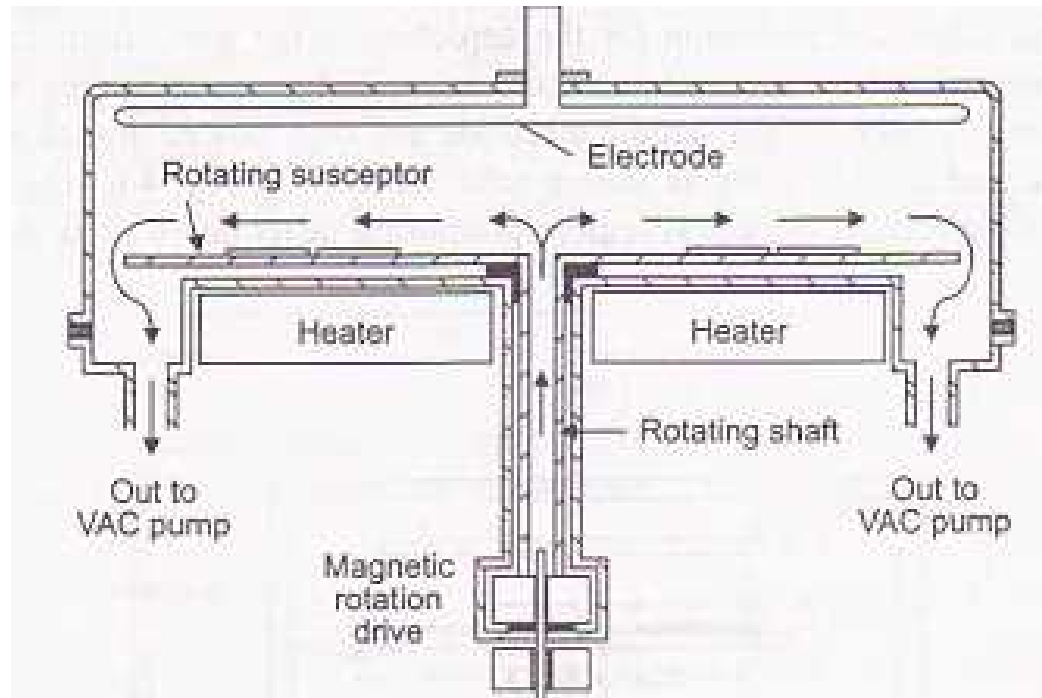
周辺

→円形電極中央へ



Sherman型 / 平行平板電極

- ・Reinberg型を改良した平行平板電極
- ・ガス流れ = 円形電極中央 → 周辺へ



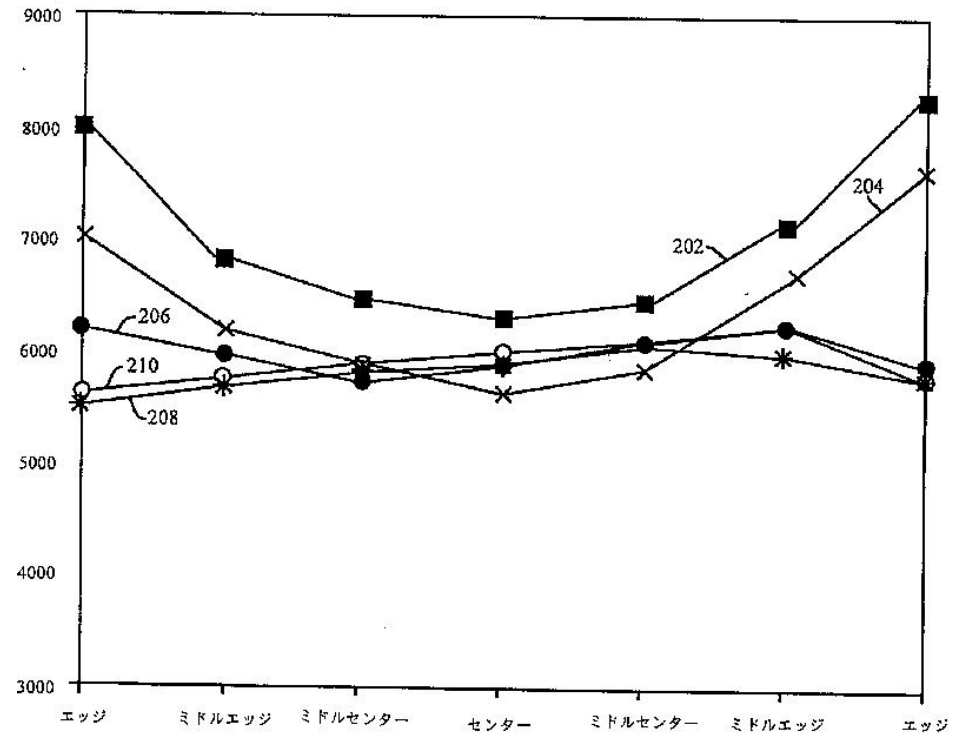
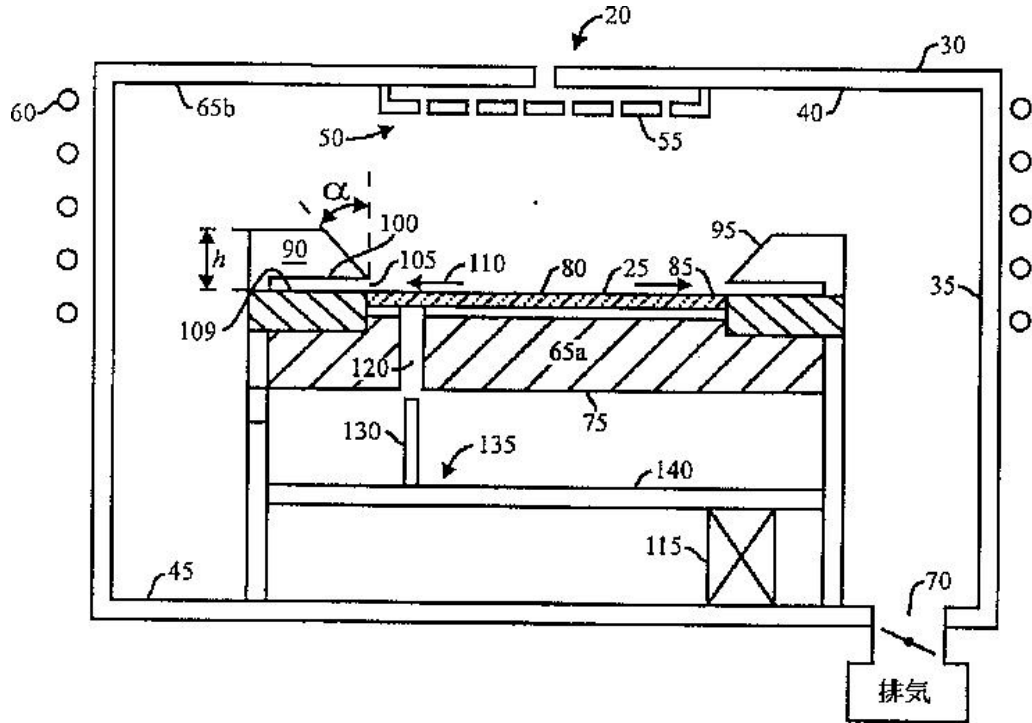
(出典)・A. Grill: Cold Plasma in Materials Fabrication from Fundamentals to Applications(IEEE PRESS,1994)

・W. C. ベンジンゲ(アプライド・マテリアルズ): 電子材料、Vol.16(1977年5月),40-45

ガスの流れと膜の均一性

(出典)特開平09-232294(アプライドマテリアル)

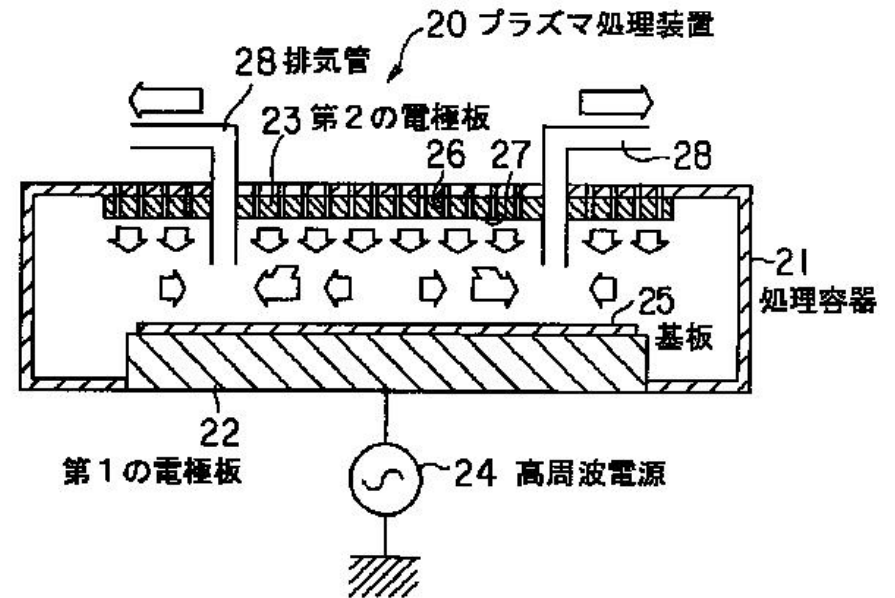
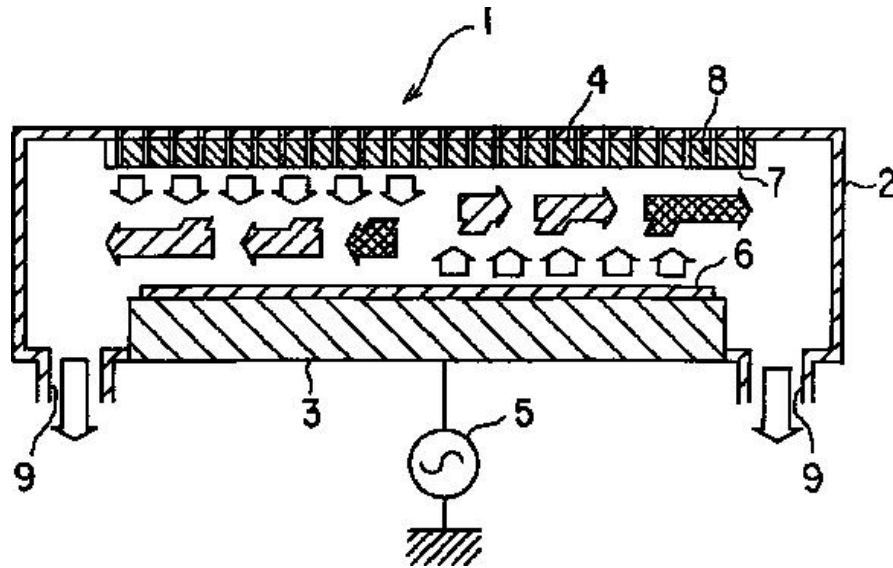
【特徴】フォーカスリング90の調整により、エッチングガスの流れ、拡散移動を調整



ガスの流れと膜の均一性

(出典)特開平11-144891(東芝)

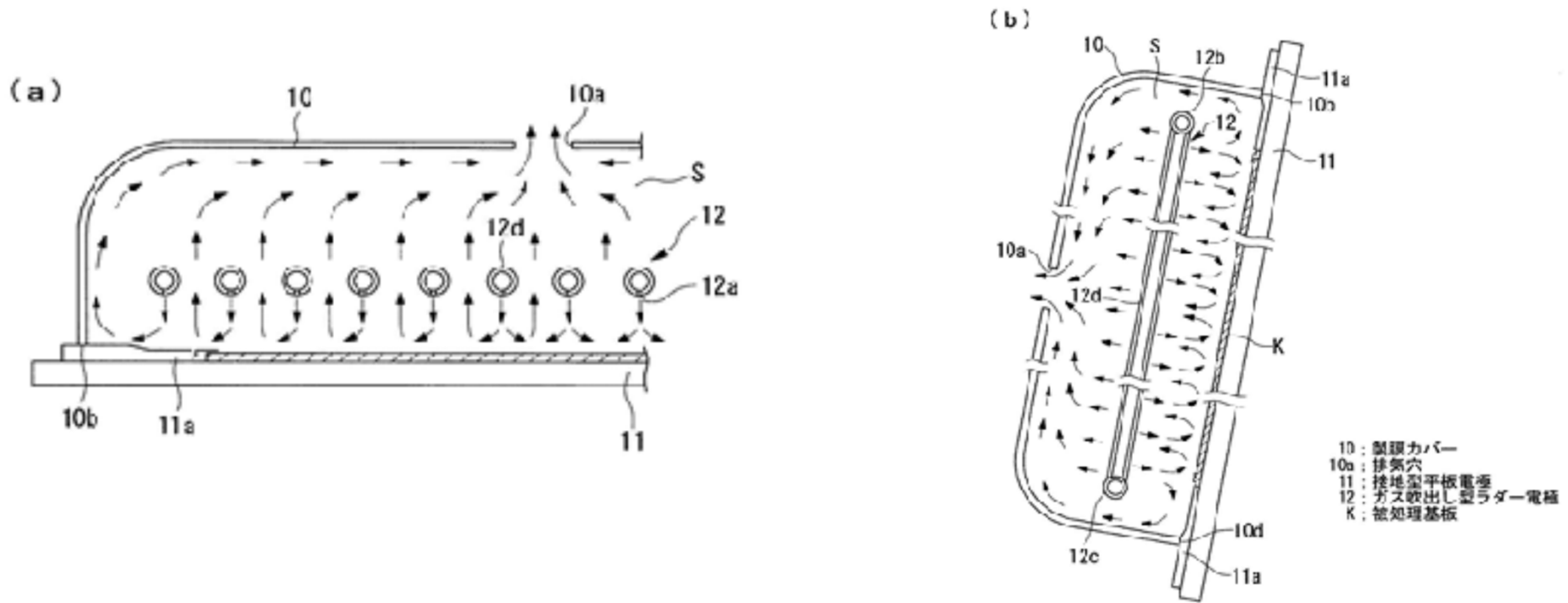
【問題】基板6の表面の処理が中央部と端部側では均一に行うことができないという問題が生じている。



製膜カバー及び真空処理装置

(出典)河野慎吾ほか(三菱重工):特許第4070731号、特願2004-31366(出願日2004. 2. 6)

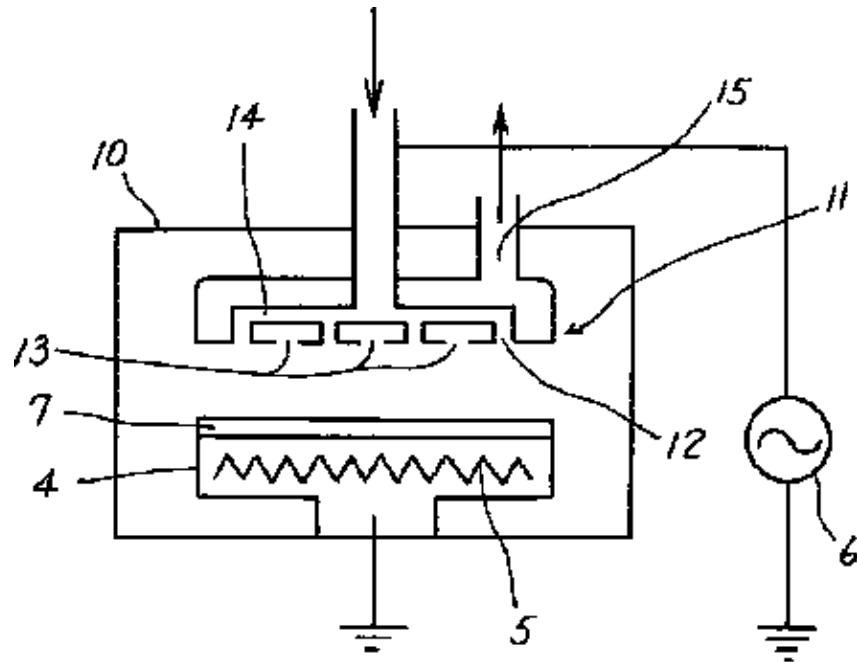
【特徴】基板が配置される接地電極と、ラダー型電極と、ガス供給系を囲むように構成された製膜カバーであって、該接地電極と対向する面の略中央部に少なくとも一つの排気孔が設けられる



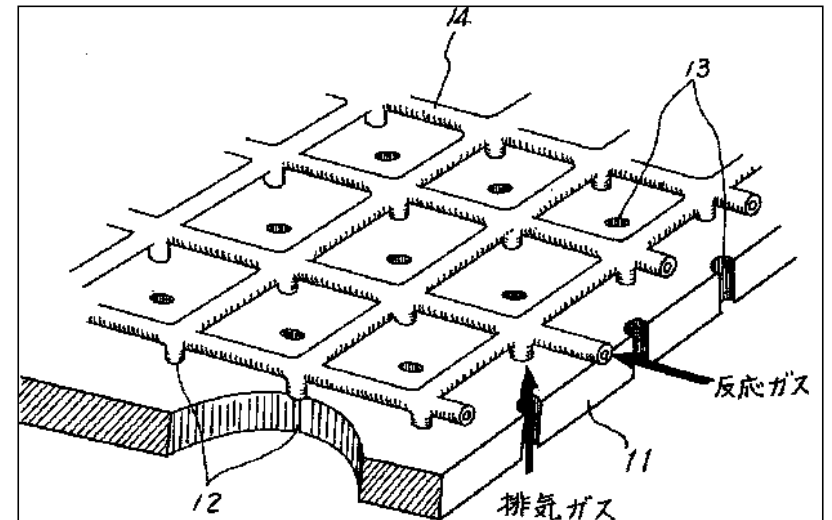
プラズマ電極装置(ガス供給・排気)

(出典)渡辺宣朗(沖電気):実開平05-90939(出願日1991. 2. 25)

【特徴】(a)基板が載置される第1の電極と、(b)該基板に対向する第2の電極と、(c)該第2の電極に形成される反応ガス導入孔と、(d)該反応ガス導入孔に近接して配設されるガス排出孔とを具備する



- 11: 対向電極
- 12: 反応ガス
導入孔
- 13: ガス排出孔
- 14: 反応ガス
導入管
- 15: ガス排出管



5. 高周波電力供給手段の留意事項

漏洩電流発生抑制

- ・例えば、 balan回路を用いて、漏洩電流発生を無くすことが高周波電力供給手段の基本である。

給電点の位置

- ・平行平板電極を用いる場合、非接地電極の接地電極に対向する端面に給電点を設けるのが良い。

プラズマCVD装置の設計・製作における留意事項／電力供給系

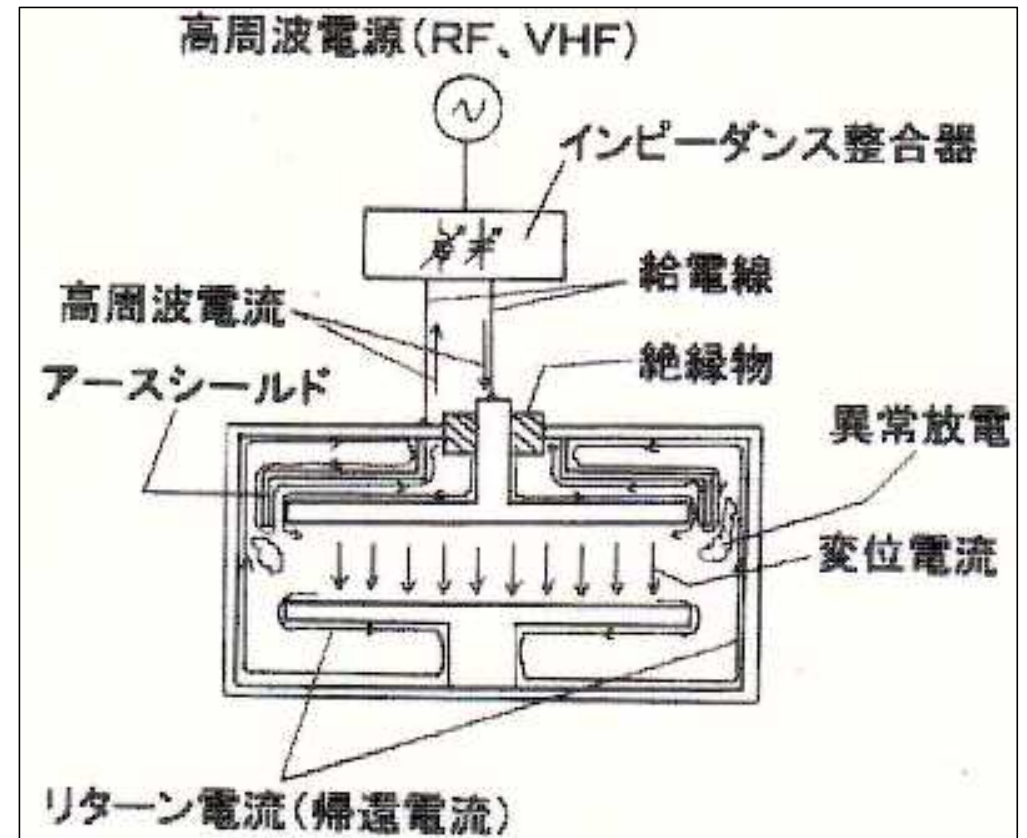
平行平板型電極での電磁エネルギー(高周波電流)の流れ／アースシールド付き電極

高周波特有の現象(表皮効果)により、導体表面を流れる

電力は、「**ポインティングベクトル $E \times H$** (電磁波)」で伝搬する。

問題の所在：
給電点の位置、給電手段に問題がある。

【出典】村田正義作成資料



終わり

ご精読、ありがとうございます。