

大面積VHFプラズマCVD装置に関する代表的な特許技術

- プラズマ不均一の要因＝電磁波の定在波

令和4年8月8日

APT代表

村田正義

定在波の発生(プラズマ不均一化の要因): 電波の干渉

▪ M.A.Lieberman et al : Plasma Sources Sci. Technol.11(2002),283-293

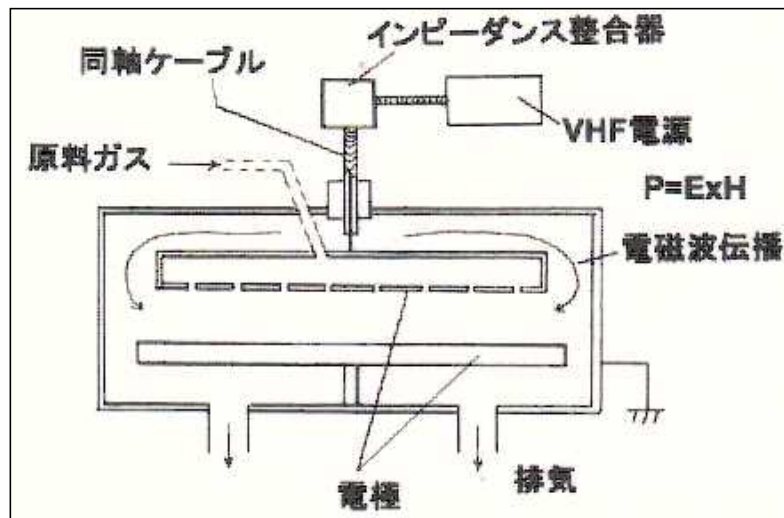
▪ A. Perret et al : Applied Physics Letters, Vol. 83, No. 2(2003), 243-245

● Liebermanモデルによるシミュレーション結果 & 実験結果



電極: 平行平板型

給電点: 電極裏側中央・1点



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

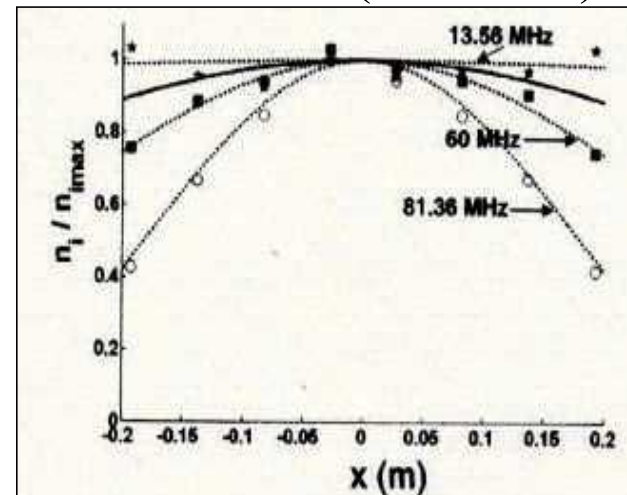


FIG. 2. Ion flux profile at $(x, y=0)$, for 150 mTorr/50 W, at 13.56 MHz (stars), 60 MHz (full squares), and 81.36 MHz (empty circles). Superimposed are the calculated profiles (dotted lines), i.e., $\cos^2(2\pi x/\lambda)$ with λ [given by Eq. (1)]. We chose $s=5$ mm at 13.56 MHz and 60 MHz and $s=3.5$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

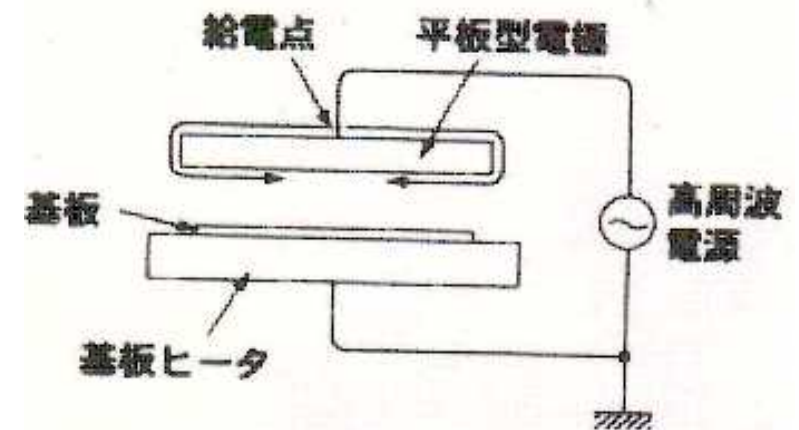
平行平板電極を用いたVHFプラズマ生成装置の 均一性の目安

●均一性を左右する要因は、定在波である

- (1) 一对の電極に供給された電力は電極周辺部から、互いに向かい合う方向より伝播し、重畳する。**その結果、干渉現象が発生する。**
- (2) **干渉パターン(電力の強さの空間的分布)は、 $\cos^2(2\pi x/\lambda)$ に比例する。**原料ガスの流れが均一であれば、膜の厚み分布は $\cos^2(2\pi x/\lambda)$ に比例する。
- (3) **干渉現象**→進行波とその反射波が重畳した場合でも、発生。

均一性の目安

- ・**RF(13.56MHz)**では、 $(\lambda/4) \times (\text{波長短縮率}0.65)$
=3.5m程度 if $(\lambda/8) \times (\text{波長短縮率}0.65) = 1.75\text{m}$
- ・**VHF(60MHz)**では、 $(\lambda/4) \times (\text{波長短縮率}0.65)$
=0.81m程度 if $(\lambda/8) \times (\text{波長短縮率}0.65) = 0.40\text{m}$



大面積・均一化を目指せるVHFプラズマCVD装置の代表例

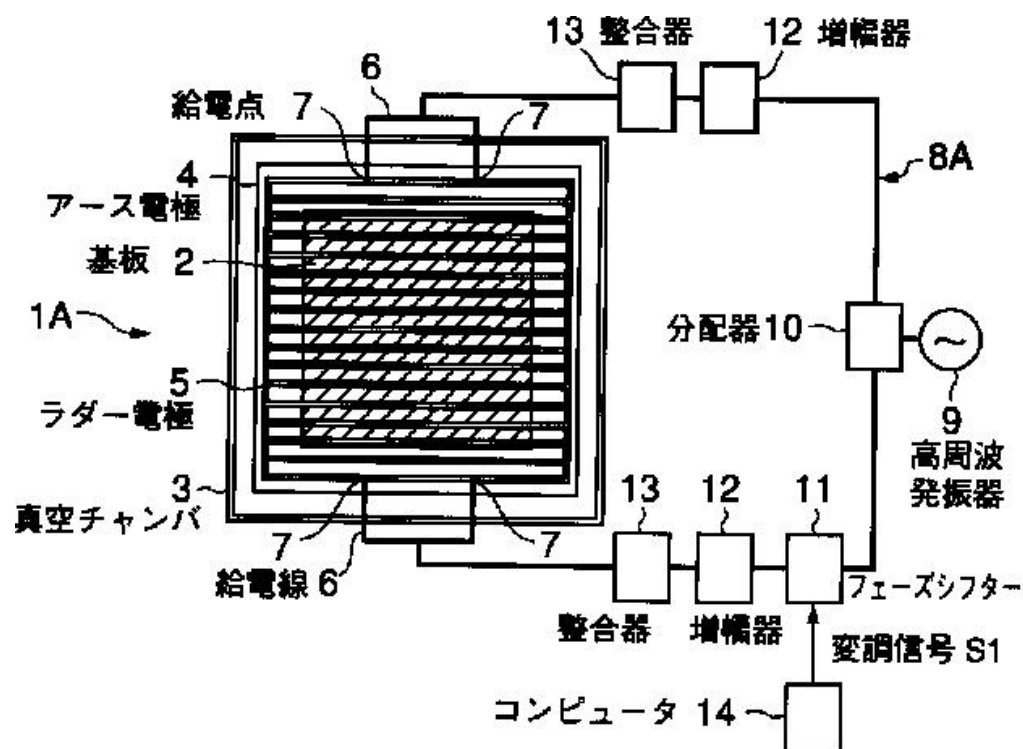
- (1) 位相変調法・・・三菱重工:特許3316490(権利消滅)
- (2) 定在波重畳法・・・村田正義:特許4264962(権利消滅)、
特許4207131(権利消滅)、特許4120831(権利消滅)
- (3) 定在波重畳法(後発型)・・・三菱電機:特許5489803(権利消滅)

大面積・均一化を目指せるVHFプラズマCVD装置の代表例

位相変調法・・・三菱重工:特許3316490(権利消滅)

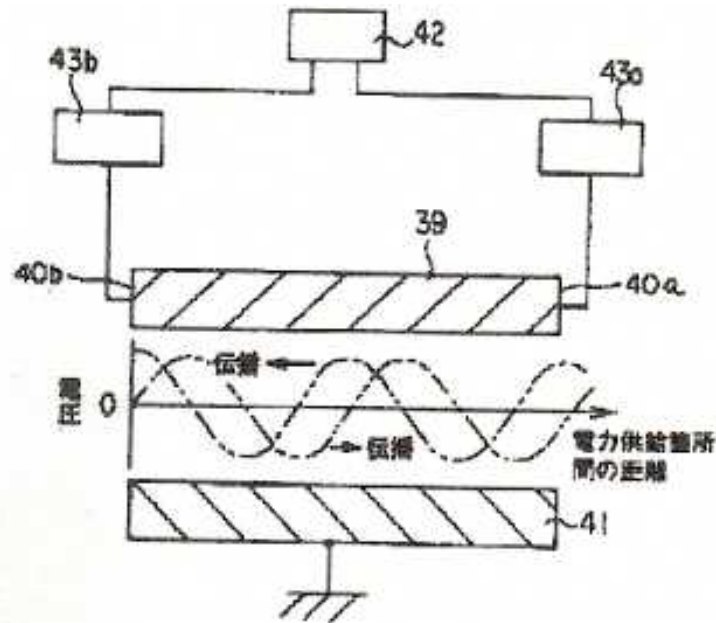
タンデム型薄膜シリコン
太陽電池製造工場
での実績、多数あり

世界的に注目された
画期的な方法

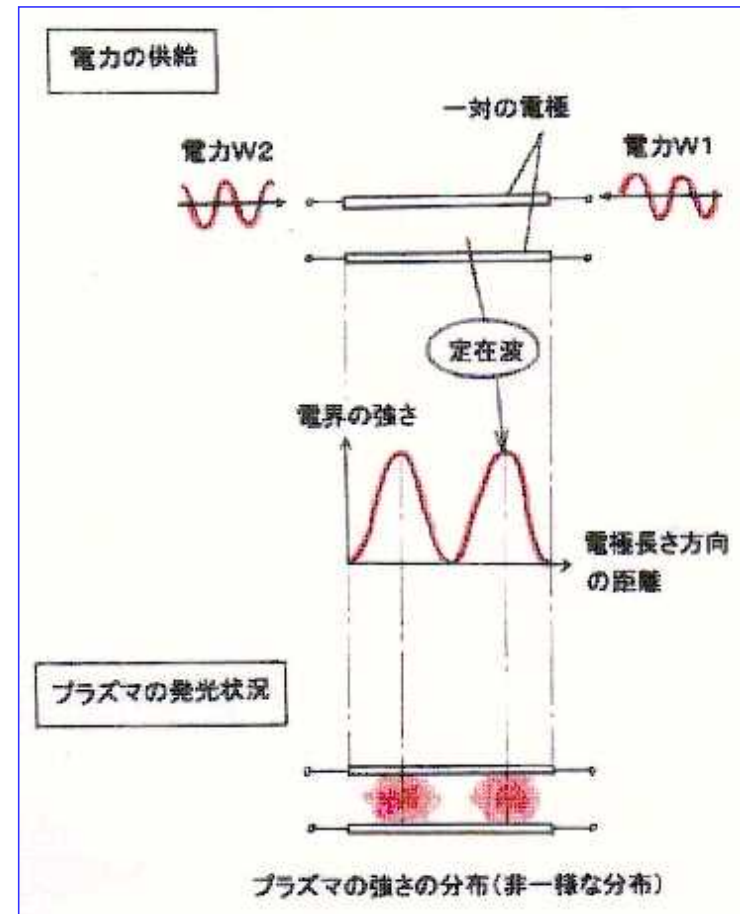


大面積・均一化を目指せるVHFプラズマCVD装置の代表例

位相変調法・・・三菱重工:特許3316490(権利消滅)



プラズマを電極面に平行方向に
変動させる⇒ 均一化

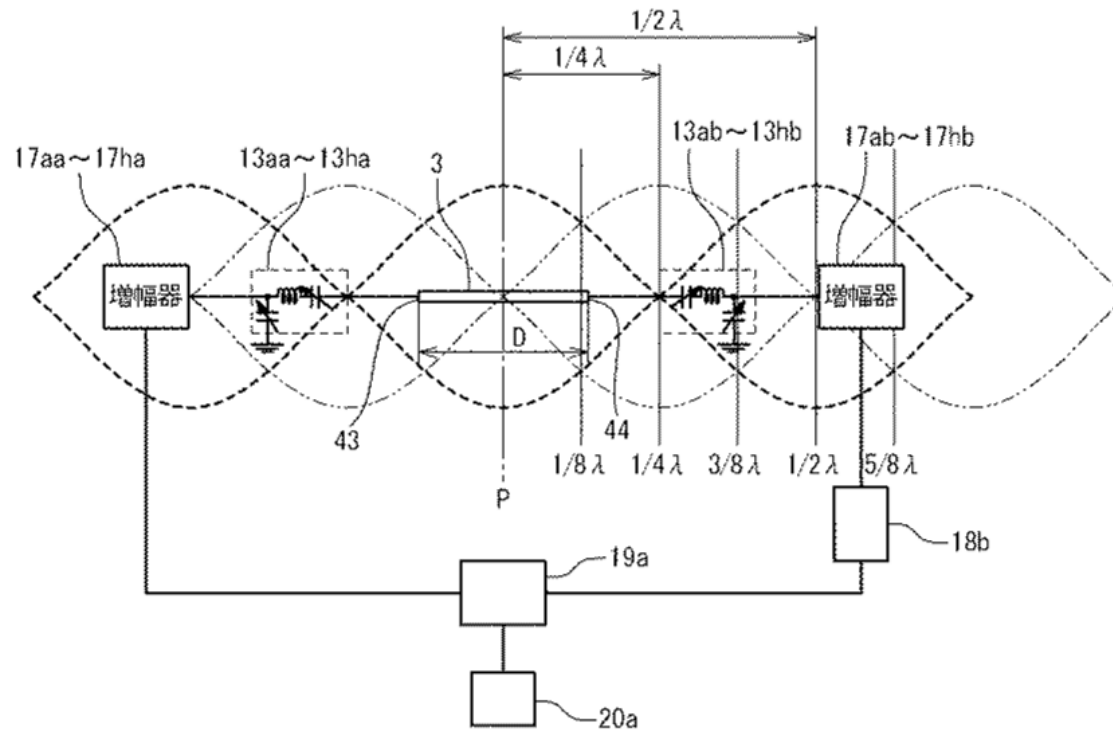


VHFプラズマの大面積化／三菱重工の特許技術

(出典)山越英男ほか(三菱重工):特許第3316490号(平成14年6月7日)

特開2001-257098(2001. 9. 21)

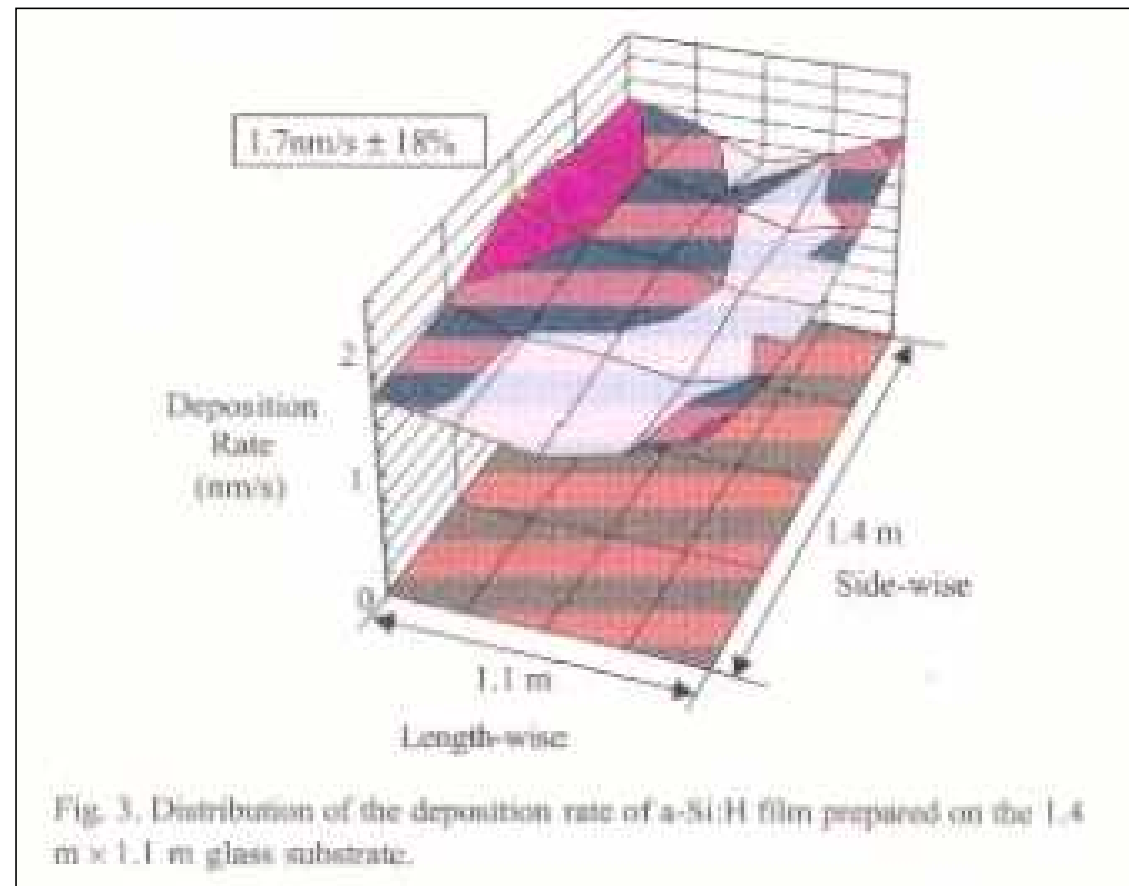
【原理】一対の電極間に発生する定在波を時間的・空間的に揺動させる



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

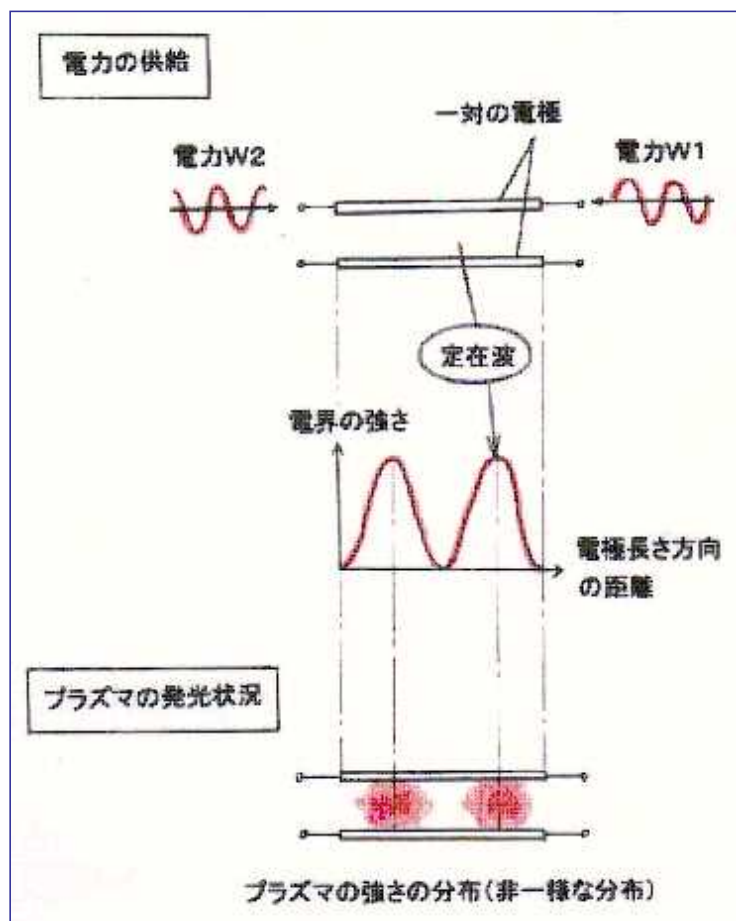
- ・周波数60MHz、
- ・基板面積1.4m×1.1m、
- ・a-Si製膜速度1.7nm/s、
- ・膜厚分布バラツキ±18%



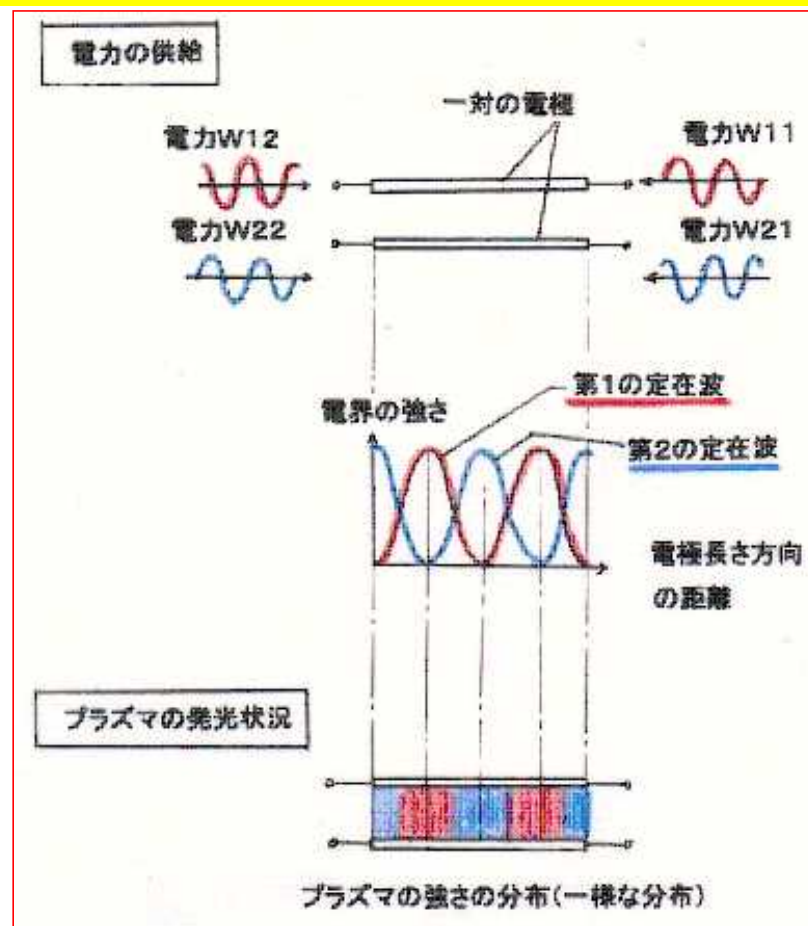
大面積・均一化を目指していたVHFプラズマCVD装置の代表例定在波重畳法

・・・村田正義:特許4264962(権利消滅)、特許4207131(権利消滅)、特許4120831(権利消滅)

三菱重工／連続波、揺動



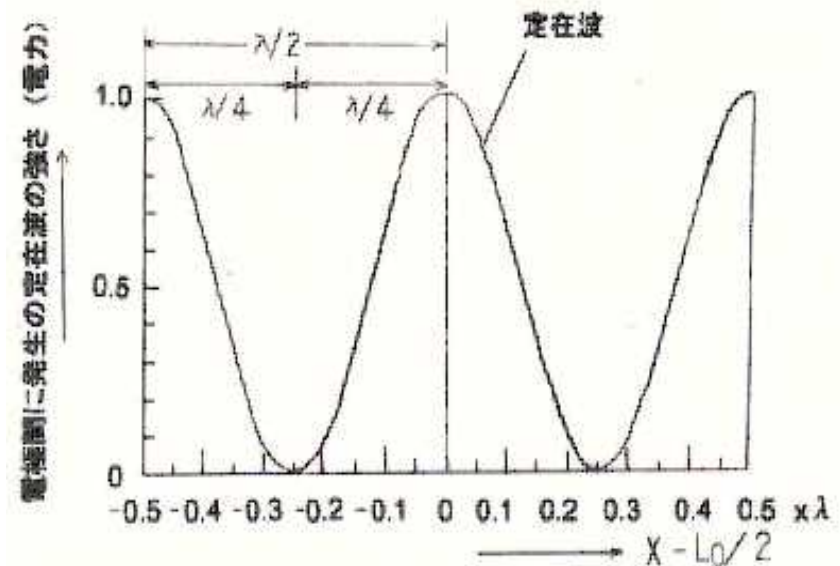
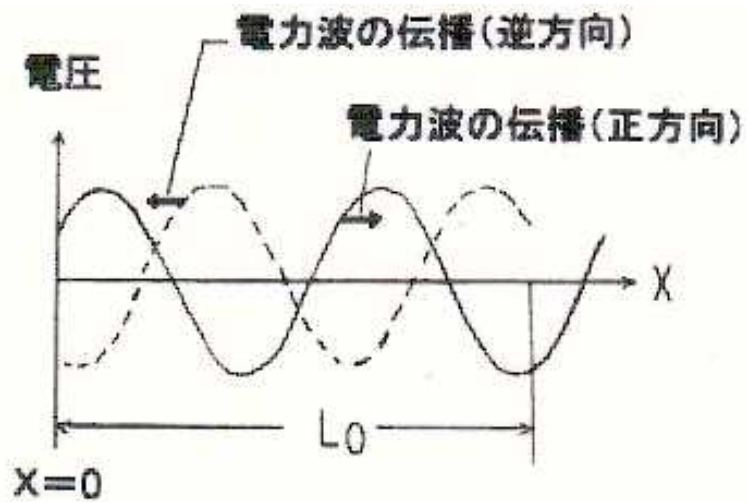
村田方式／パルス波(時間的に交互に、定在波)



村田方式／アイデア 説明に係わる補足(1/2)

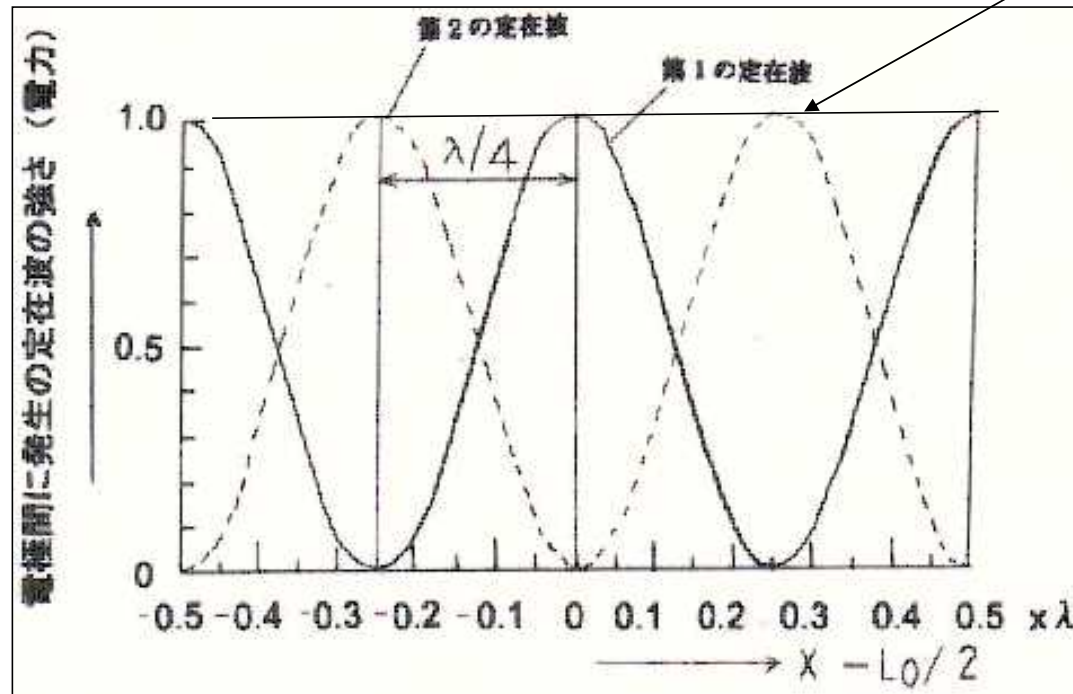
電波の干渉(電磁波の干渉)

$$I(x) = \cos^2 \left\{ 2\pi(x - L_0 / 2) / \lambda - \Delta\theta / 2 \right\}$$



村田方式／アイデア説明に係わる補足(2/2)

●定在波I(x)の腹の位置の調整



$$I(x) = \langle I(x, t) \rangle$$

$$= \cos^2 \{2\pi(x - L0/2) / \lambda\} + \sin^2 \{2\pi(x - L0/2) / \lambda\}$$

$$= 1$$

村田方式定在波重畳法 VHFプラズマCVD装置(基板が水平の場合)

装置構成

●位相可変2出力
VHF電源 x 2台

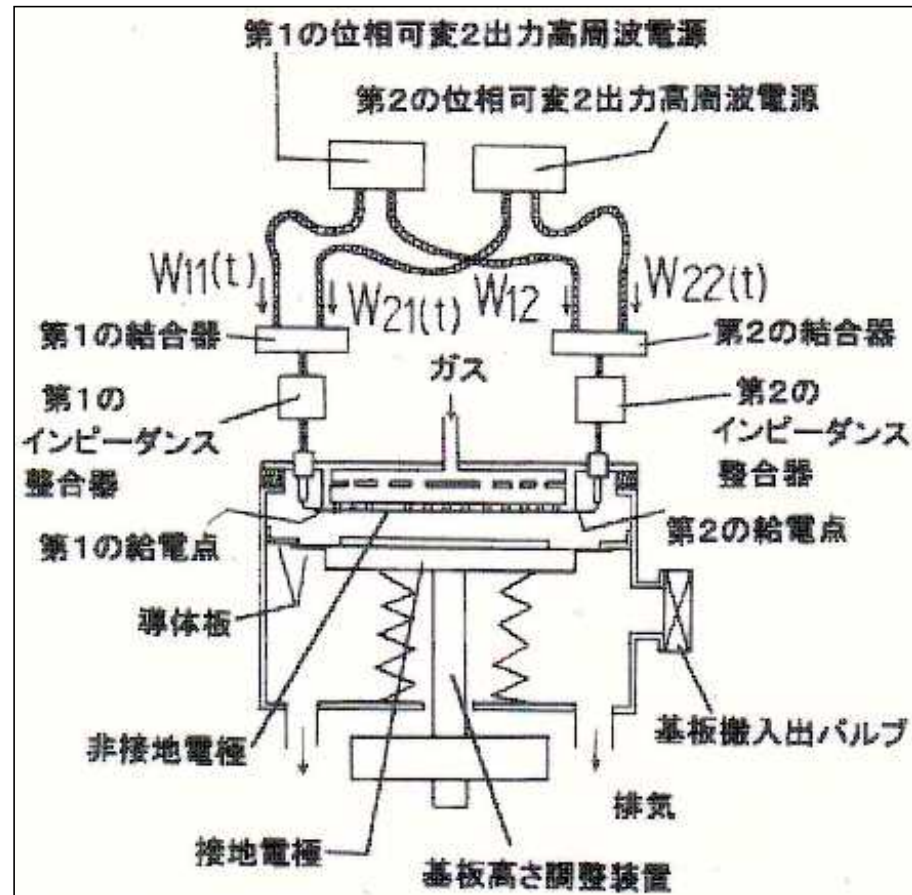
●仕様(条件)

(1) 2台の電源出力は
干渉しない

:相互インコヒーレントの電力

(2) 各電源の出力の電圧の位相は
任意に調整可能

(3) 各電源の出力はパルス電力

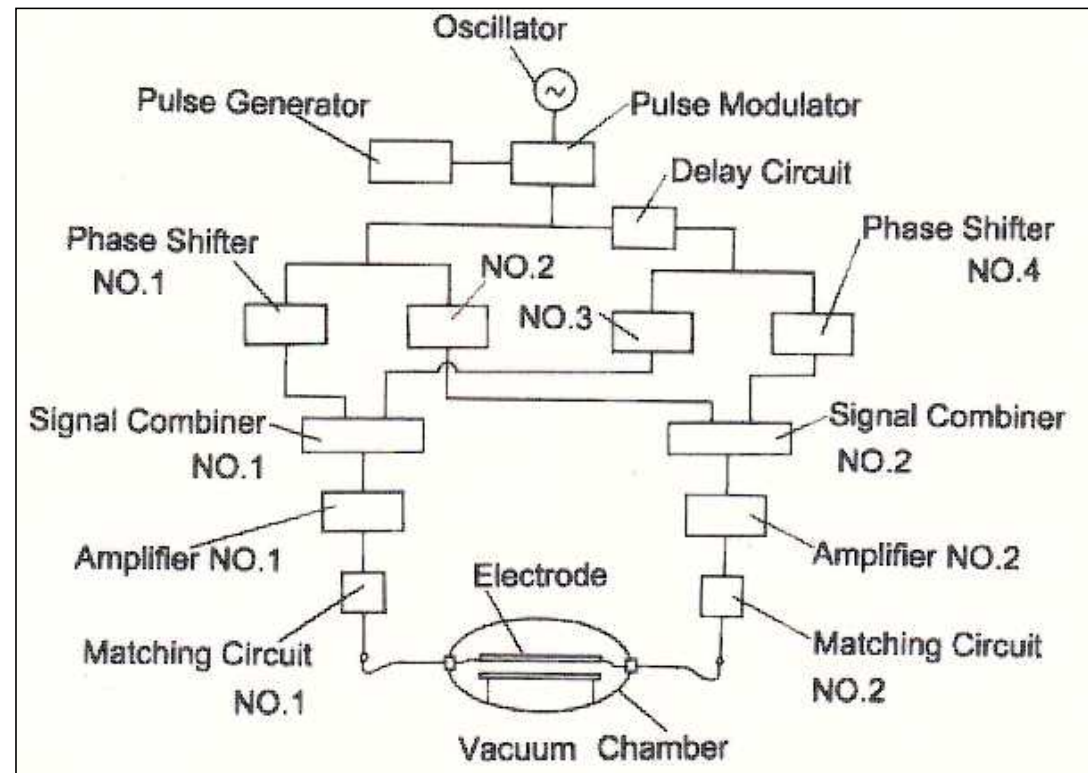
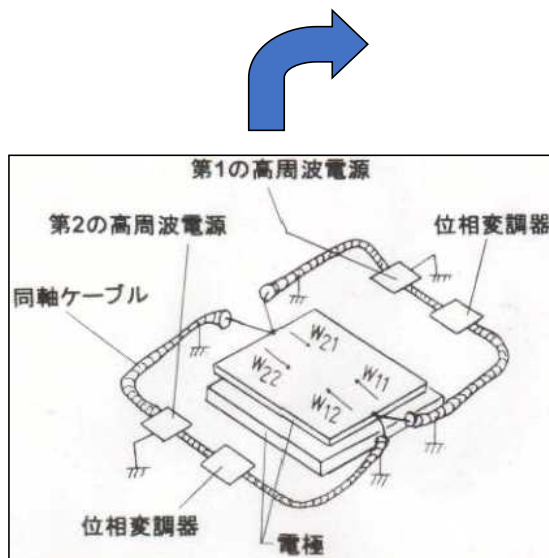


VHFプラズマの大面積・均一化 村田方式(定在波重畳法)アイデア検証実験(世界初)

1. 主たる仕様

周波数: 200MHz、出力: 400W、パルス繰返し数: 約1~2kHz、パルス幅: 約10 μ S~1mS、
パルスのデューティ: 50%以下、定在波の個数: 2個、定在波の制御範囲: 2波長程度

2. 装置構成



VHFプラズマの大面積・均一化 村田方式／定在波重畳法アイデア検証実験(世界初)

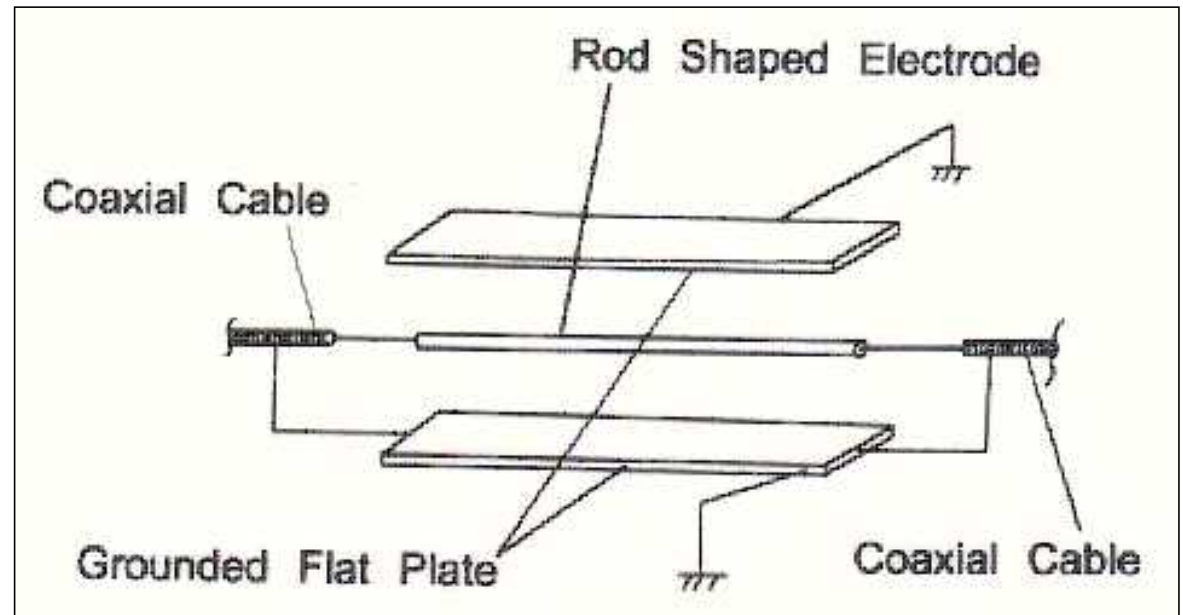
実験装置(電極の構成)

電極構造・寸法

- ・棒電極: 直径20mmx長さ280mm
- ・接地電極
: 幅70mmx長さ300mmx厚み3mm
- ・電極間隔: 5~15mm

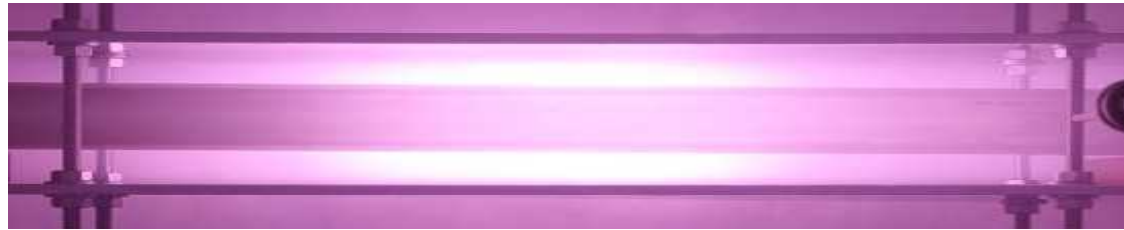
ガス: 水素

圧力: 0.7~2.0Pa(5~15mTorr)

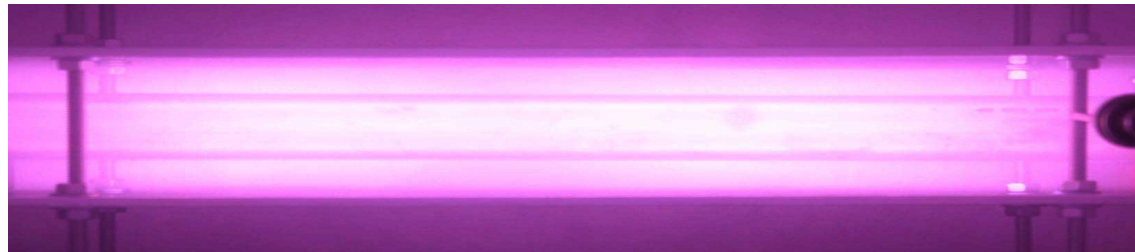


村田方式／プラズマ生成実験の結果（世界初）

(1) 従来法（極大値、中央） $\Leftrightarrow I(x) = \cos^2(2\pi x / \lambda + \Delta\theta)$



(2) 定在波重畳法 $\Leftrightarrow I(x) = 1$ \Leftrightarrow 波長依存性なし



● 一様なプラズマの生成が可能

実験（周波数200MHz）で確認

村田方式ノプラズマ生成実験結果 (世界初)

H18年3月23日、応物理学会にて発表

- 互いに独立に発生された「2つの定在波」の腹の位置の間隔を $\lambda/4$ にして重畳すると、次式に従うプラズマが生成

⇒ 水素プラズマ生成実験で、検証

- プラズマの強さ $I(x)$ が一様に成ることを実験で確認

$$\begin{aligned} I(x) &= \cos^2(2\pi x / \lambda + \Delta\theta) + \cos^2(2\pi x / \lambda + \Delta\theta + \pi / 2) \\ &= \sin^2(2\pi x / \lambda + \Delta\theta) + \cos^2(2\pi x / \lambda + \Delta\theta) \\ &= 1 \end{aligned}$$

●定在波重畳法の特徴

- ①定在波の影響を抑制可能
- ②プラズマの強さの分布が一定値(波長依存性無)
- ③VHFプラズマ装置での大面積・均一化への応用可能

村田方式(特許技術)を活用したワイエイシイの装置／実証試験

大面積・高速・高品質VHFプラズマCVD装置

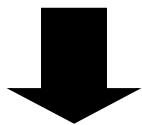
(出典)H.Kaneko et al: Plasma Processes and Polymers,2009,6,S269-S272.

【装置の構成】

電極サイズ

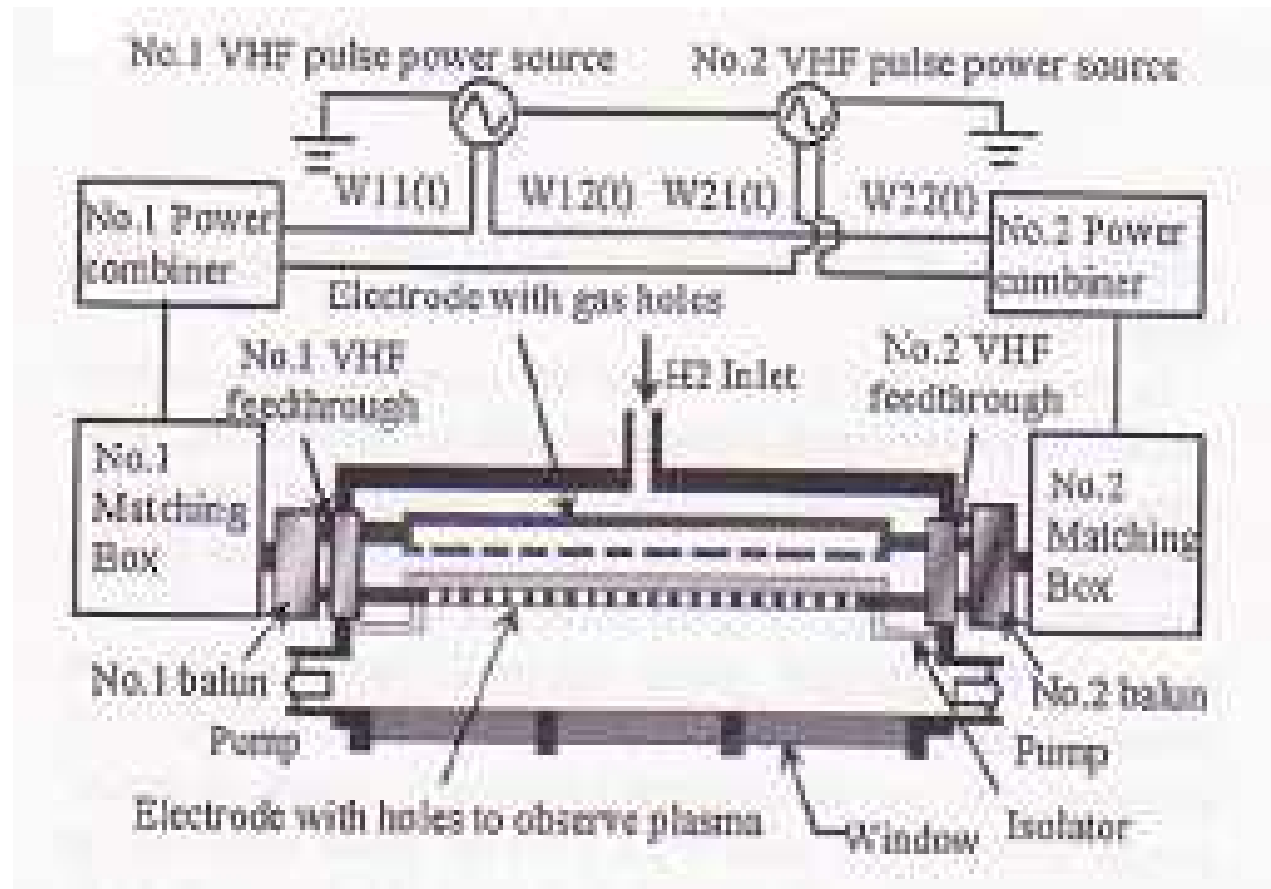
= 1.8m x 0.3m

周波数 = 80MHz



並列設置で

大面積化可能

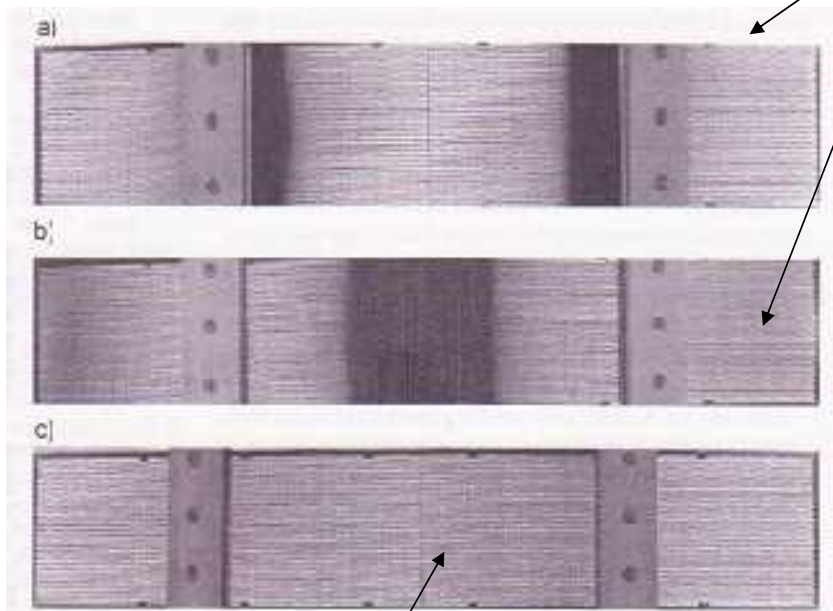


村田方式(特許技術)を活用したワイエイシイの装置 / 実証試験

大面積・高速・高品質VHFプラズマCVD装置

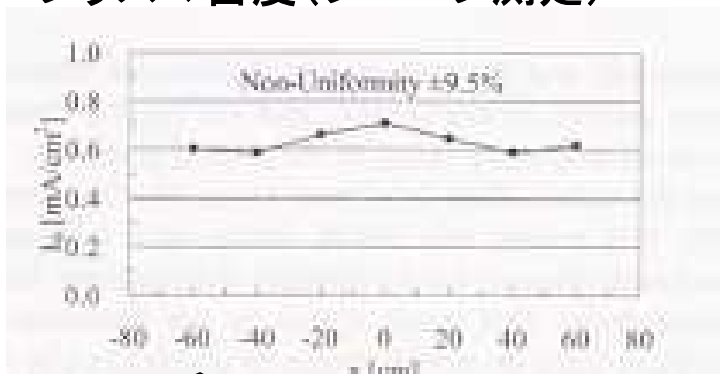
(出典)H.Kaneko et al: Plasma Processes and Polymers,2009,6,S269-S272.

【プラズマ生成状況】デジカメ写真

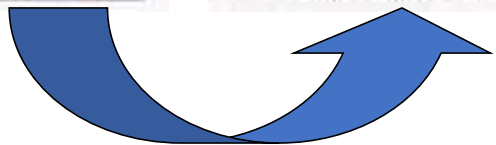


定在波 \cos^2x
定在波 \sin^2x

【プラズマ生成状況】
プラズマ密度(プローブ測定)



定在波 \cos^2x + 定在波 \sin^2x
= 1



ワイエイシイ(村田方式)の大面積VHFプラズマCVD装置

真空容器サイズ:1.52m(高さ)x2.0m(幅)x0.8m(奥行き)

電極サイズ:1.8mx30cm

80MHz、水素プラズマ密度分布:9.5%
が得られている。

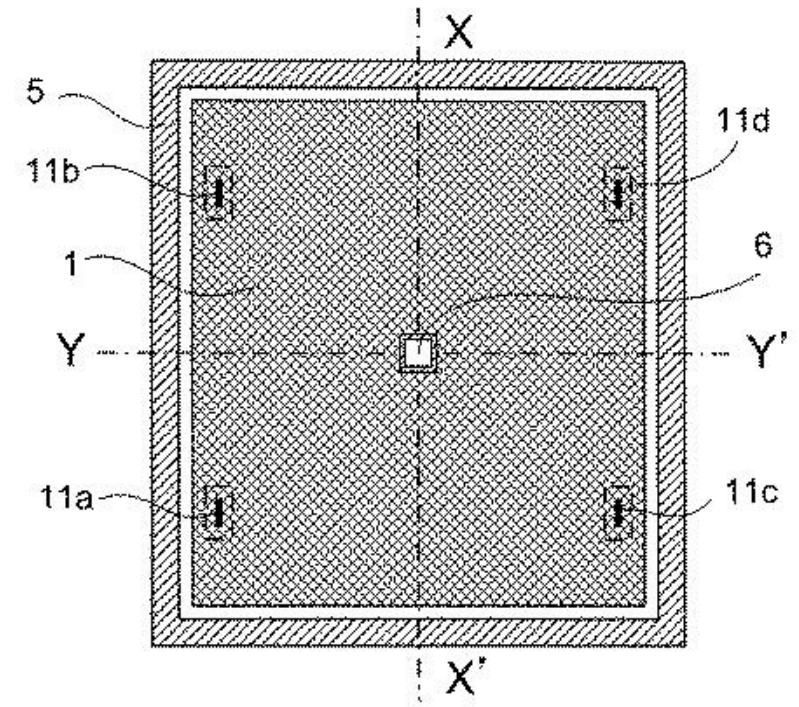
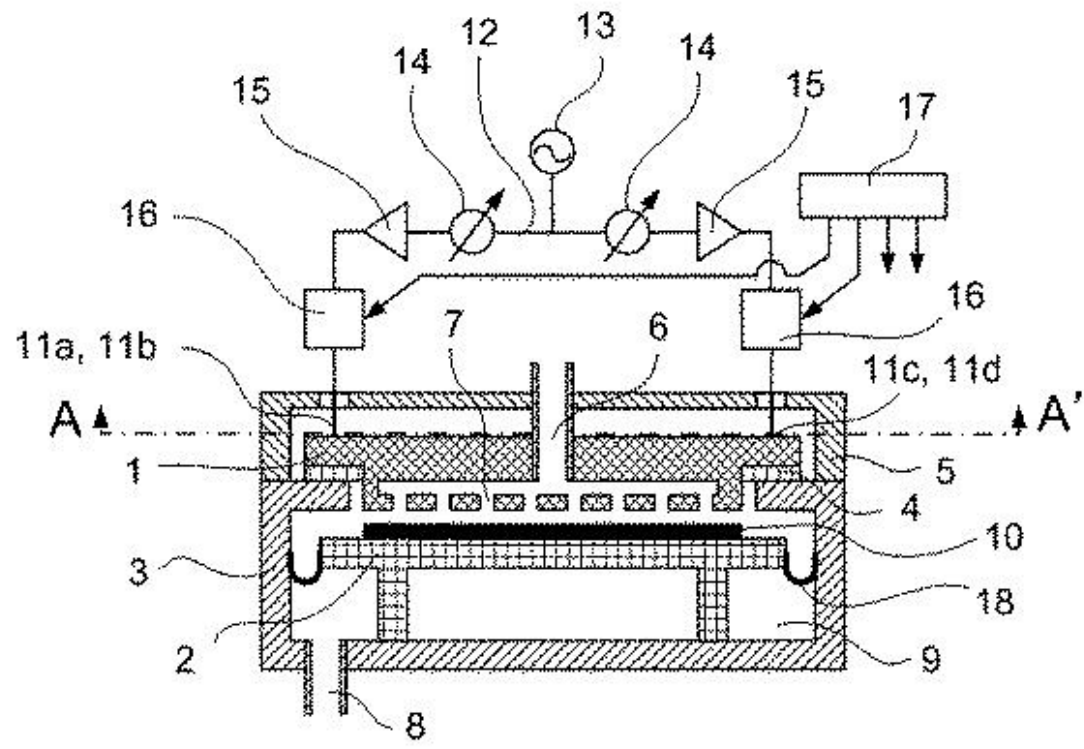
【出典】

H.Kaneko et al:

Production of VHF excited H₂ Plasma by New Method of
Superposing the Standing Waves,
Plasma Processes and Polymers,2009,6,S269-S272.

大面積・均一化を目指せるVHFプラズマCVD

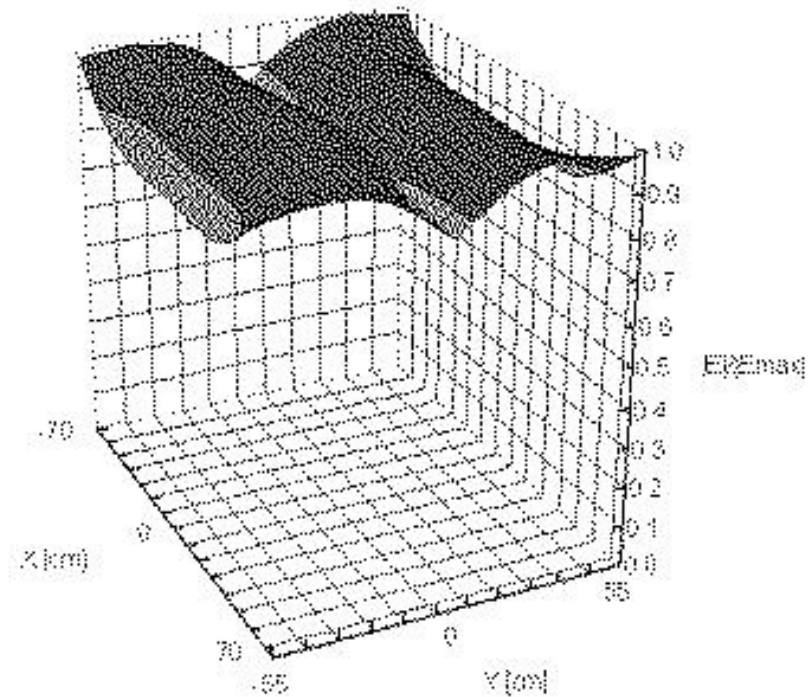
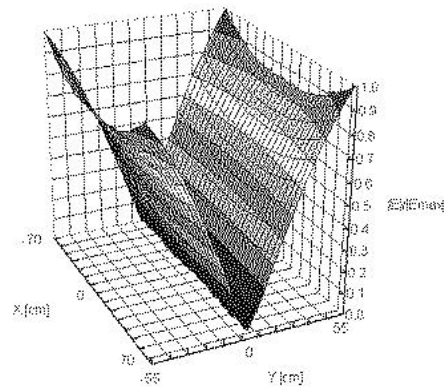
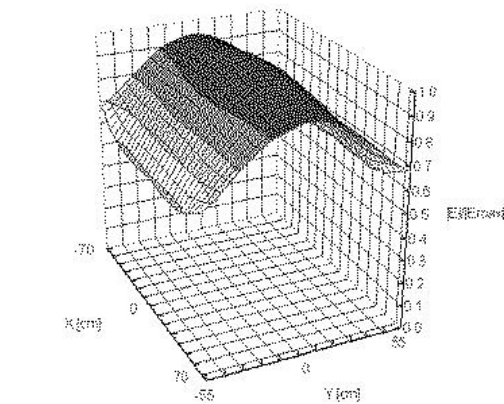
…定在波重畳法(後発型)、三菱電機:特開2011-195909/特許5489803(権利消滅)



4 絶縁スペーサ、11a, 11b, 11c, 11d 給電点、12 高周波給電回路、13 発振器、14 可変移相器、15 増幅器、16 整合器、17 制御装置、18 可変減衰器、

大面積・均一化を目指していたVHFプラズマCVD／計算機シミュレーション

…定在波重畳法(改良型)、三菱電機:特開2011-195909／特許5489803(権利消滅)



同相状態と逆相状態の時間比が4:1となるように切り替えた場合の電界強度の平均値を示す図。電界強度分布のばらつきが±5%以内

終わり

ご精読、ありがとうございます。