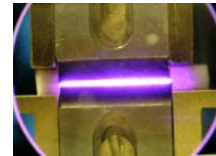


# MICRODECHARGES MICROONDES

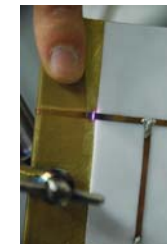


Caroline Boisse-Laporte

Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas  
Bât.210, Université Paris-Sud  
91405 Orsay Cedex

[Caroline.Boisse-Laporte@u-psud.fr](mailto:Caroline.Boisse-Laporte@u-psud.fr)

0169158173



# Plan de la présentation

---



- Les microdécharges : considérations générales
- Les différents types de microdécharges
  - DC-MHCD, DBD, Couronnes, RF capacitives et inductives
  - Microondes : spécificités et différents types
- Les microdécharges microondes de type stripline
  - Plasma dans un capillaire/Plasma localisé dans un gap
  - Couplage sans plasma/avec plasma
  - Quelques résultats expérimentaux et de modélisation
- Les microdécharges microondes de type microjets

# Les microdécharges : considérations générales

---



Loi de Paschen :

champ de claquage minimum pour  $pd \sim 0.1-10 \text{ Torr.cm}$

soit à pression atmosphérique un  $\text{gap de } \sim 100 \mu\text{m}$

Faible puissance nécessaire :  $\sim \text{Watt}$

pour une forte densité de puissance :  $\text{kW/cm}^3$  au  $\text{MW/cm}^3$

( $\sim \text{W/cm}^3$  pour les décharges de grand volume)

Plasma **hors ETL** :

Rapport surface/volume important

Gaz à température ambiante, électrons énergétiques

Intégration facilitée à pression atmosphérique :

Pas besoin de système de pompage

# Les différents types de microdécharges



D'après Iza et al, Plasma Processes and Polymers 2008, 5, 322-344  
Microplasmas: Sources, Particle Kinetics, and Biomedical Applications  
230 références

## DC et Hollow Cathode Discharges

Compactes et 'faciles' à réaliser

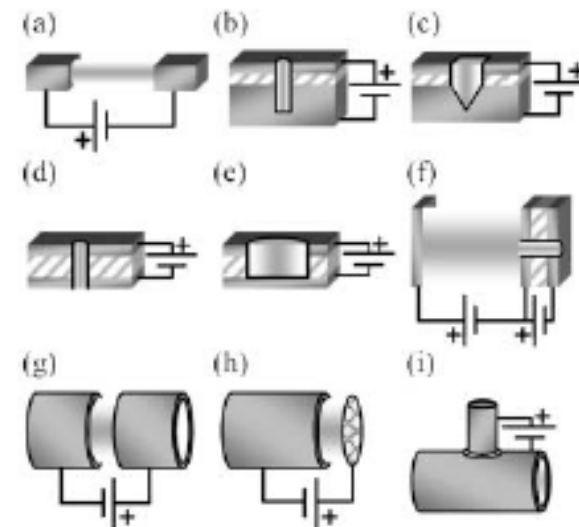
Alimentation 'simple'

Erosion des électrodes

Schematic of various DC microplasma sources:

a) parallel electrode, b) cylindrical microhollow cathode, c) inverted pyramidal microhollow cathode, d) metal-insulator-metal microhollow cathode, e) cathode boundary layer, f) three-electrode source, g) microtubes, h) microtube with grid anode, and i) microtube with inserted anode.

Solid colours represent metal electrodes and hatched objects represent dielectric materials.



# Les différents types de microdécharges



## Dielectric Barrier Discharges

Fonctionnement typique au kHz

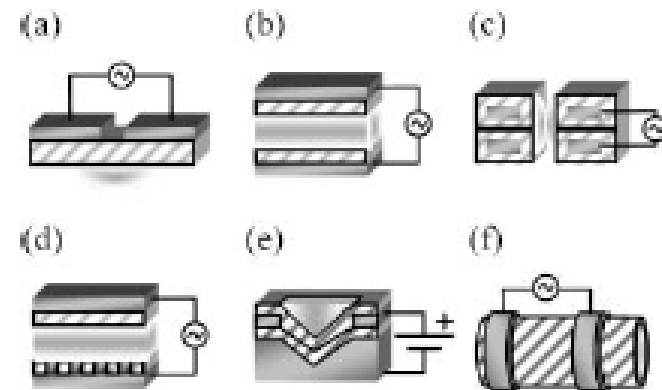
En général filamenteuses

Application principale : PDP (Plasma Display Panel)

Schematics of dielectric barrier microdischarges:

a) coplanar DBD, b) parallel plate DBD, c) coaxial DBD, d) capillary plasma electrode discharge, e) pyramidal DBD, and f) capillary discharge/plasma pencil/plasma jet.

The solid colour represents metal electrodes and hatched objects represent dielectric materials.



## Coronas

DC et RF

Champ électrique très inhomogène

Création du plasma sur la pointe

# Les différents types de microdécharges



## RF Capacitively Coupled Plasmas

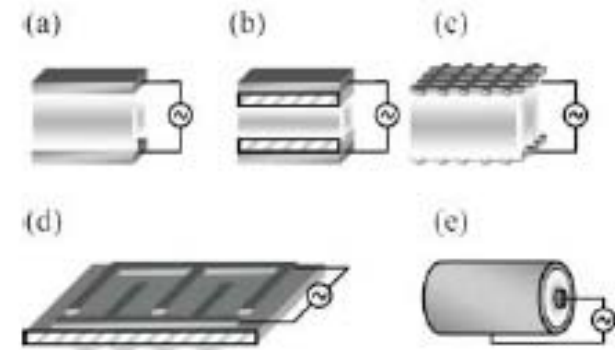
Fonctionnement typique de 1 à 100MHz

Densité électronique limitée

Problèmes de stabilité

Schematics of RF capacitively coupled microplasmas:

a) parallel plate with bare electrodes, b) parallel plate with dielectric-covered electrodes, c) grid electrodes, d) comb electrodes, and e) coaxial jet.



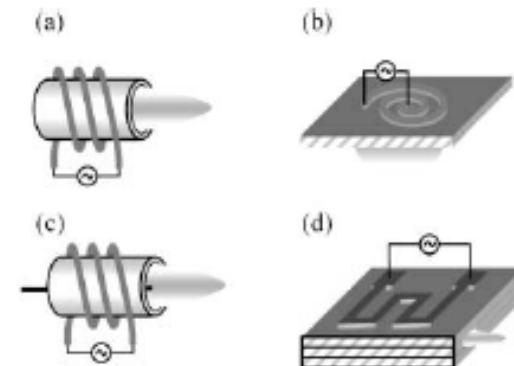
## RF Inductively Coupled Plasmas (ICP)

Fonctionnement à qqes 100aines de MHz

A pression atmosphérique, courant très élevé nécessaire

Schematics of inductively coupled microplasma sources:

a) coil, b) planar spiral, c) coil+filament, and d) serpentine.



# Les différents types de microdécharges



## Microwave Plasmas (1/2)

Efficacité du transfert d'énergie aux électrons par des ondes HF

Fonctionnement à  $\sim$  GHz, soit une longueur d'onde de qqes 10cm  $>$  dimensions du microplasma



Comportement capacitif dans les gaines  
 $V_g \sim 1/\omega^2$  ( $\sim$ 10-20 V)

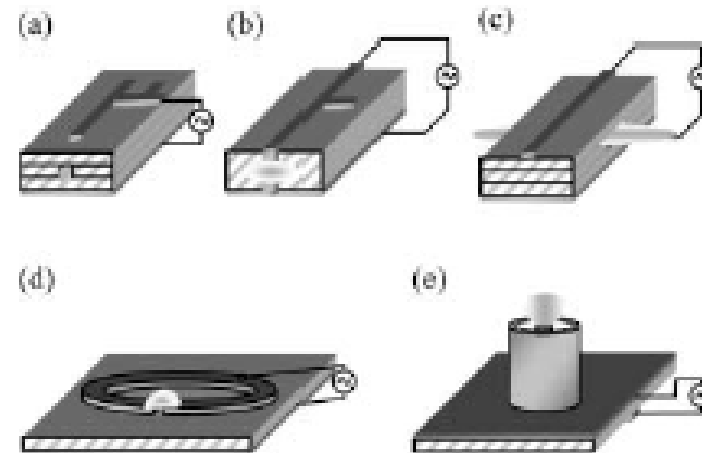


Peu de bombardement des électrodes

Fonctionnement en continu ou pulsé

Schematics of microwave microplasma sources:

a) Microstrip linear resonator, b) microstrip linear resonator with engineered end, c) surface wave launcher based on microstrip technology, d)  $l/2$  microstrip split-ring resonator, and e) coaxial source.



# Les différents types de microdécharges

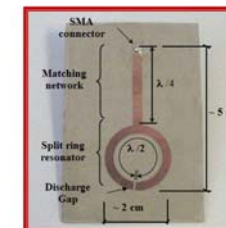
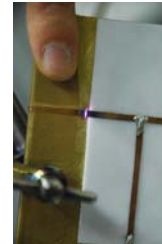


## Microwave Plasmas (2/2)

2 types d'excitation microonde :

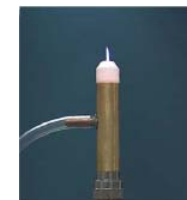
### Ligne microstrip :

- Plasma dans un **capillaire**  
Bilgic + Broekaert (Allemagne)  
Grotjohn + Asmussen (USA)
- Plasma localisé dans un **gap**  
Iza + Hopwood (USA)  
Kono (Japon)  
Gregorio + Alves + Boisse-Laporte + Leprince + Leroy  
(France-Portugal)



### Ligne coaxiale : microplasma jet

Zakrzewski (Pologne)  
Kanazawa (Japon)

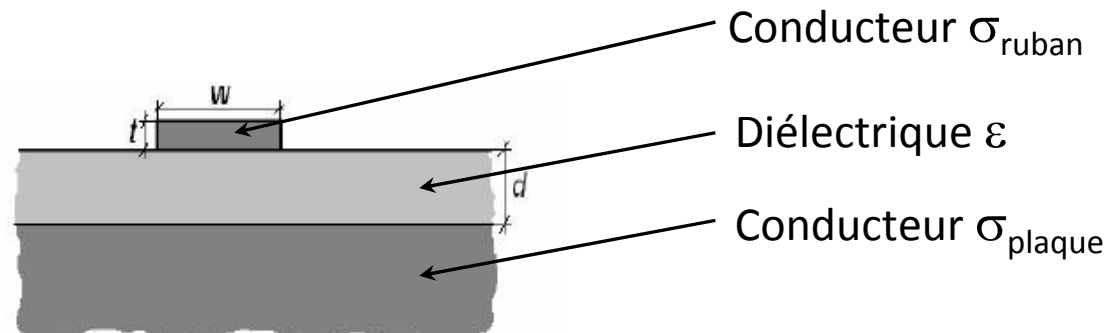




# microdécharges microondes de type stripline



## Ligne microstrip (stripline)



La théorie est facilement accessible.

Pour  $w > d$ , l'impédance  $Z_0$  est donnée par :

$$Z_0 = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{\epsilon_r \left( w/d + 1.393 + 0.667 \cdot \ln(w/d + 1.444) \right)}}$$

Dimensionnement pour adaptation en général à  $50\Omega$ .

Exemples :

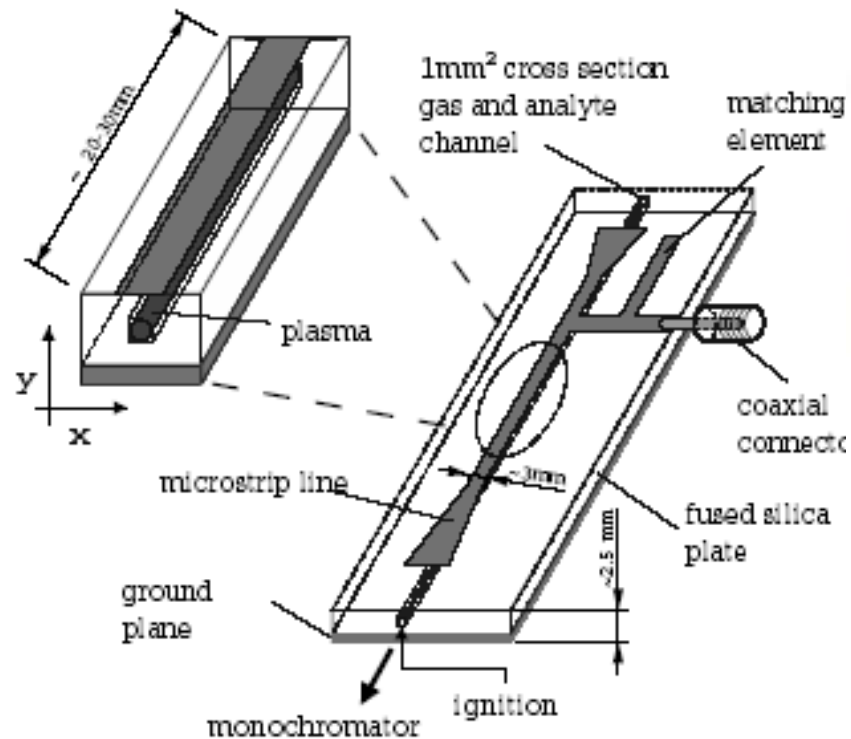
circuit imprimé classique en verre époxy  $d=1,6\text{mm}$  et cuivre  $t=35\mu\text{m}$ ,  $w=2,8\text{mm}$ .

Microdécharge Orsay : plaque en laiton, diélectrique en teflon  $d=1\text{mm}$ , conducteur en cuivre  $t=0.4\text{mm}$ ,  $w=2\text{mm}$ .

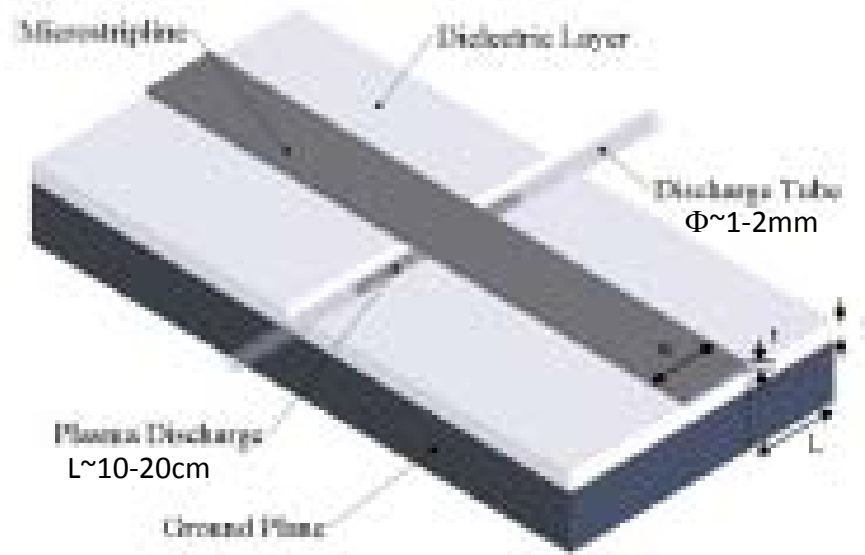
# microdécharges microondes de type stripline



## Ligne microstrip – plasma dans un capillaire



Bilgic + Broekaert (Allemagne)



Grotjohn + Asmussen (USA)

# microdécharges microondes de type stripline



## Ligne microstrip – plasma localisé dans un gap

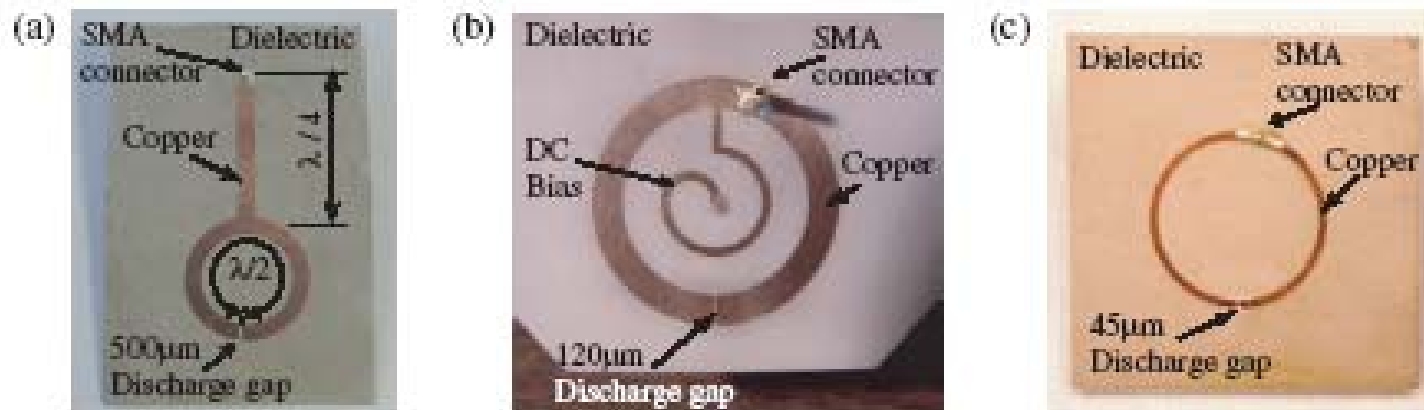


Figure 1. Top view of three 20 mm diameter MSRR microplasma sources. Frequency of operation  $\sim 900$  MHz. (a) Device I: gap size,  $g = 500 \mu\text{m}$ ; dielectric thickness,  $t = 635 \mu\text{m}$ ; microstrip characteristic impedance,  $Z_0 = 20 \Omega$ . (b) Device II:  $g = 120 \mu\text{m}$ ;  $t = 635 \mu\text{m}$ ;  $Z_0 = 20 \Omega$ . (c) Device III:  $g = 45 \mu\text{m}$ ;  $t = 2.54 \text{ mm}$ ;  $Z_0 = 70 \Omega$ .

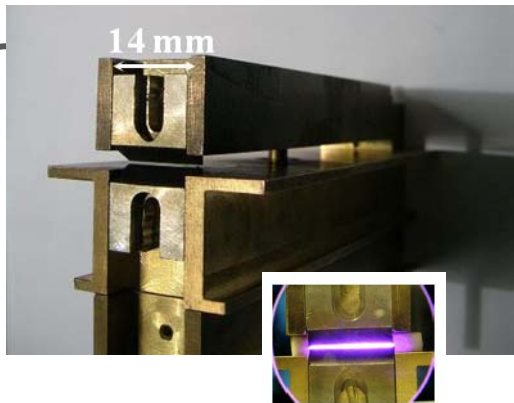
Iza + Hopwood (USA)

# microdécharges microondes de type stripline

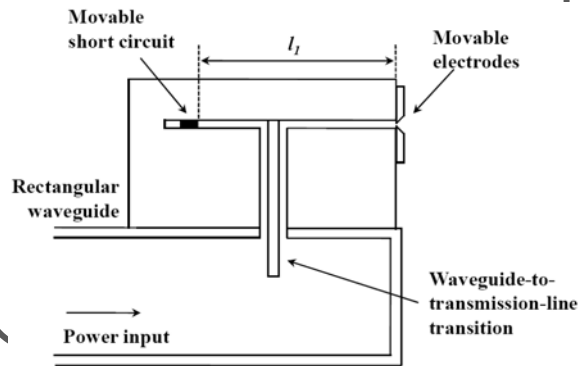


## Ligne microstrip – plasma localisé dans un gap

Source 1



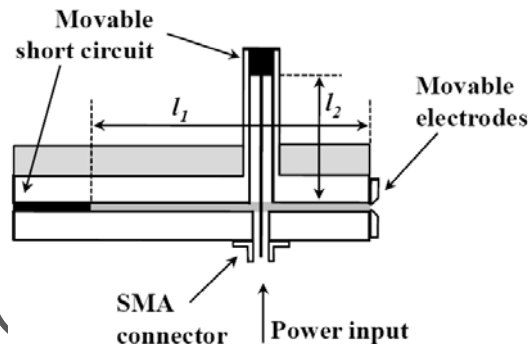
50-150 W



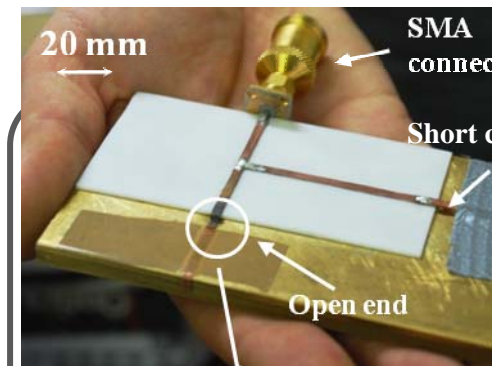
Source 2



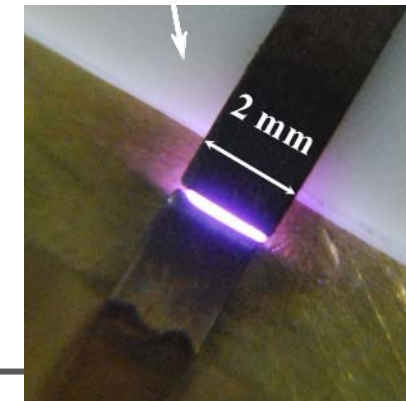
30-50 W



Source 3



< 10 W



LPGP Orsay (France) 2.45 GHz

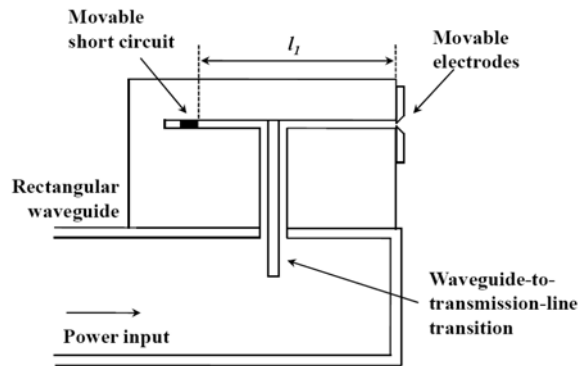
# microdécharges microondes de type stripline



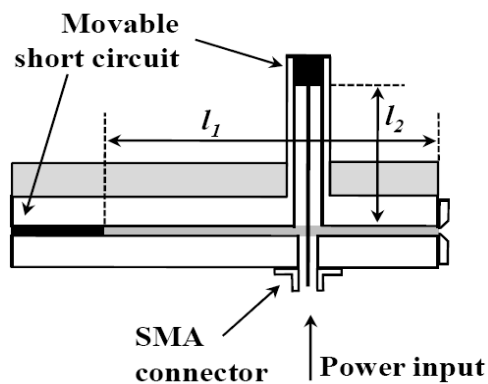
## Ligne microstrip – couplage sans plasma

Utilisation d'un analyseur de réseau (network analyser)

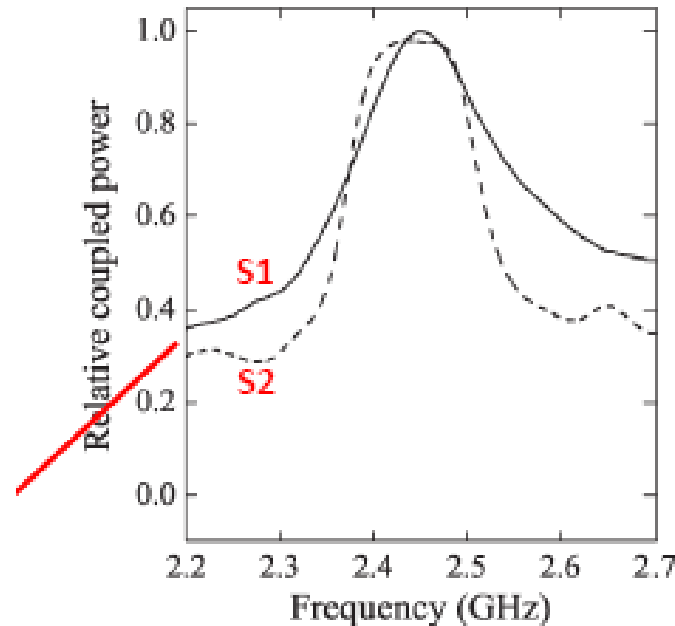
Source 1



Réglage de  $l_1$  pour avoir un maximum de puissance couplée à  $f_0=2.45\text{GHz}$



Source 2



Gap size: 100  $\mu\text{m}$

S1 (solid) :  $l_{20} = 72.1 \text{ mm}$

S2 (dashed) :  $l_{10} = 67.8 \text{ mm}$  (@  $l_{20} = 6 \text{ mm}$ )

# microdécharges microondes de type stripline



## Ligne microstrip – couplage sans plasma

Utilisation d'un analyseur de réseau (network analyser)

$f_0$  d'un circuit RLC:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad \begin{array}{l} L_0 : \text{circuit inductance} \\ C_0 : \text{circuit capacitance} \end{array}$$

Au gap : accumulation de charges

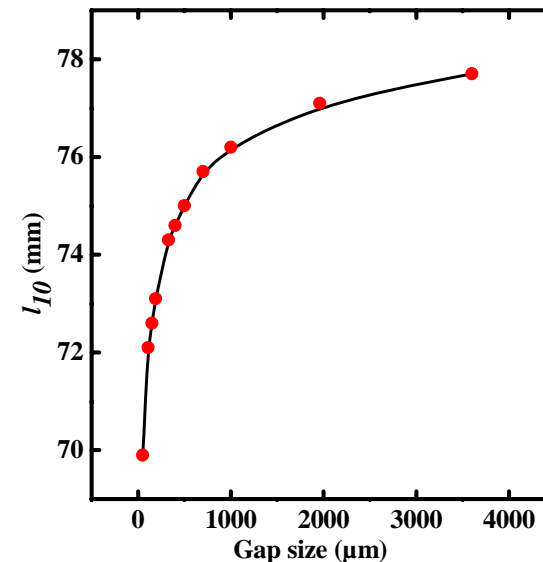
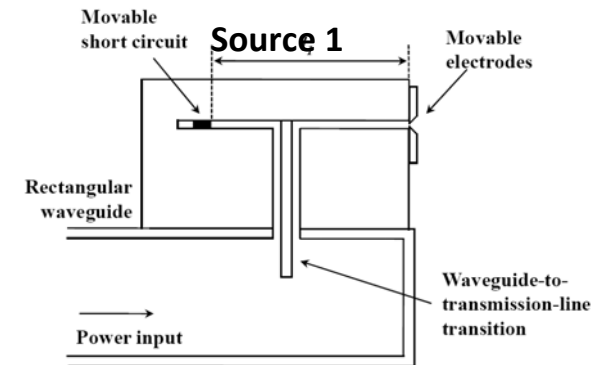
$$C_0 : C_L // C_F$$

$$C_F = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

Increasing the gap size ( $d$ )  $\implies C_F \downarrow \implies f_0 \uparrow$

$\implies$  Increase in the resonant line length ( $l_{10}$ )

to retune the system at  $f_0 = 2.45 \text{ GHz}$

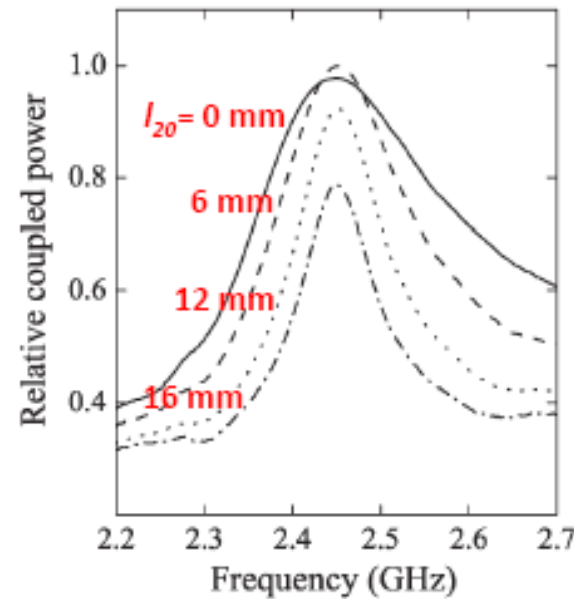
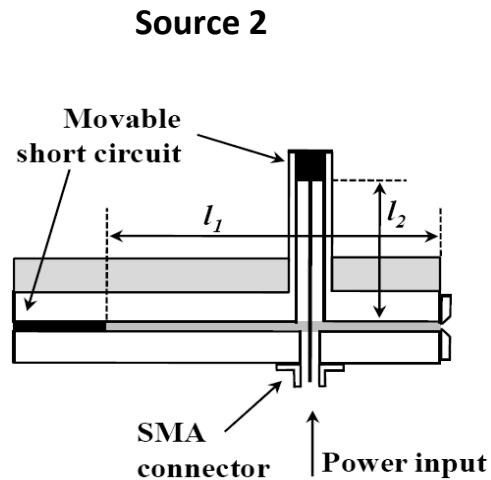


# microdécharges microondes de type stripline

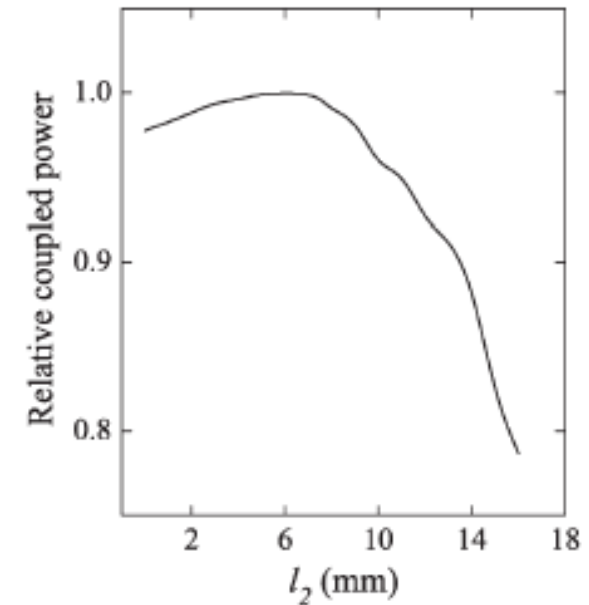


## Ligne microstrip – couplage sans plasma

Utilisation d'un analyseur de réseau (network analyser)



Gap size:  $100 \mu\text{m}$   
 $l_{10} = 67.8$  mm



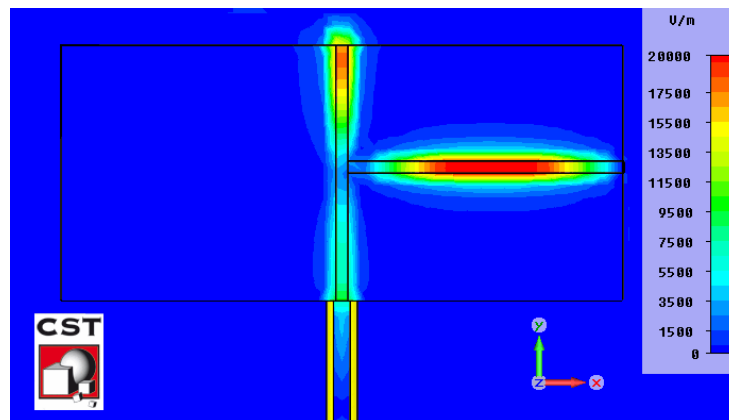
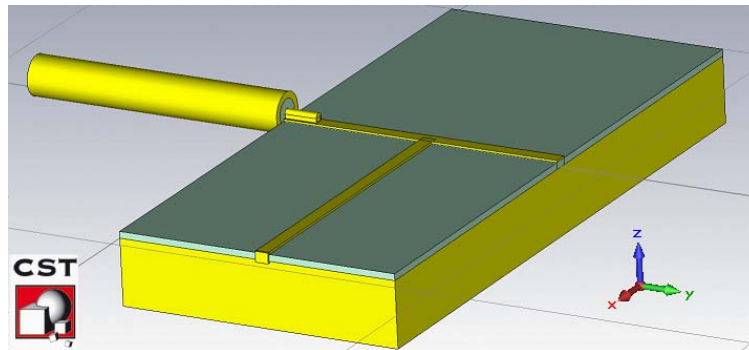
@ 2.45 GHz resonance

# microdécharges microondes de type stripline

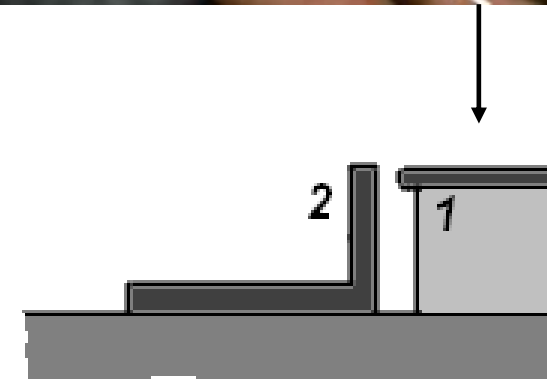
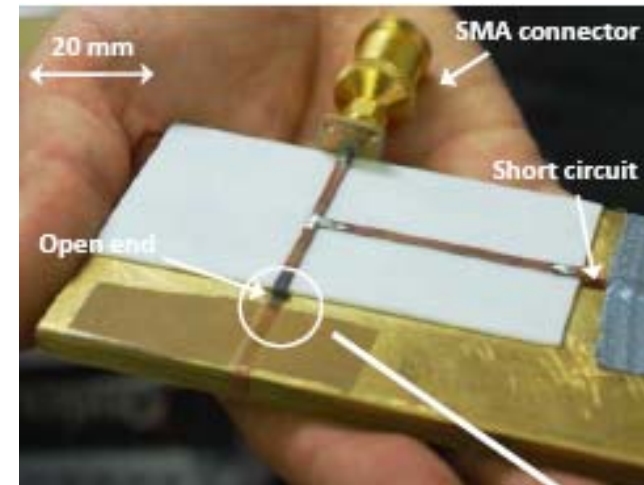


## Ligne microstrip – couplage sans plasma

Utilisation d'un code électromagnétique



Source 3



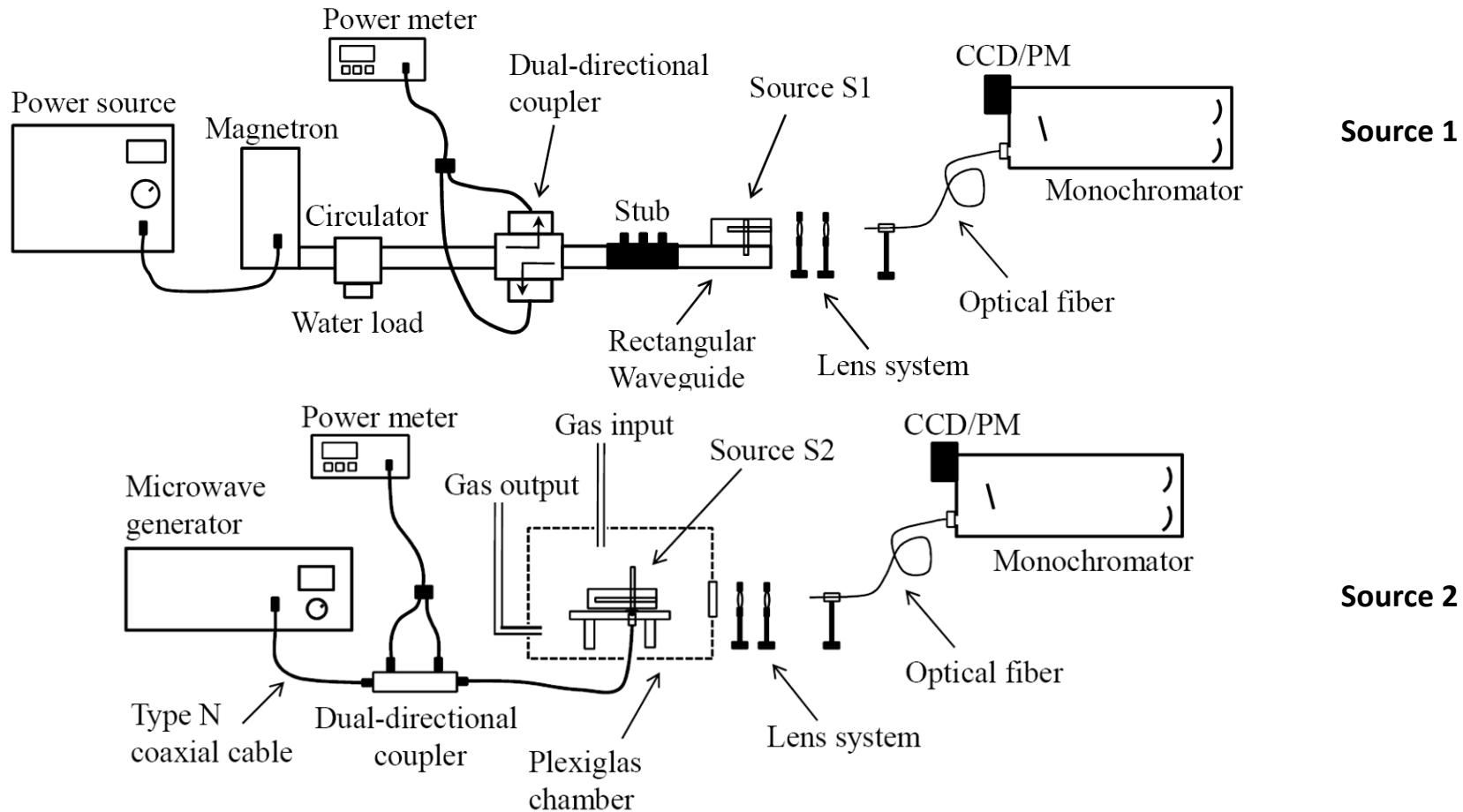


# microdécharges microondes de type stripline



## Ligne microstrip – couplage avec plasma

Utilisation d'un coupleur et d'un wattmètre : mesure Pinc et Pref

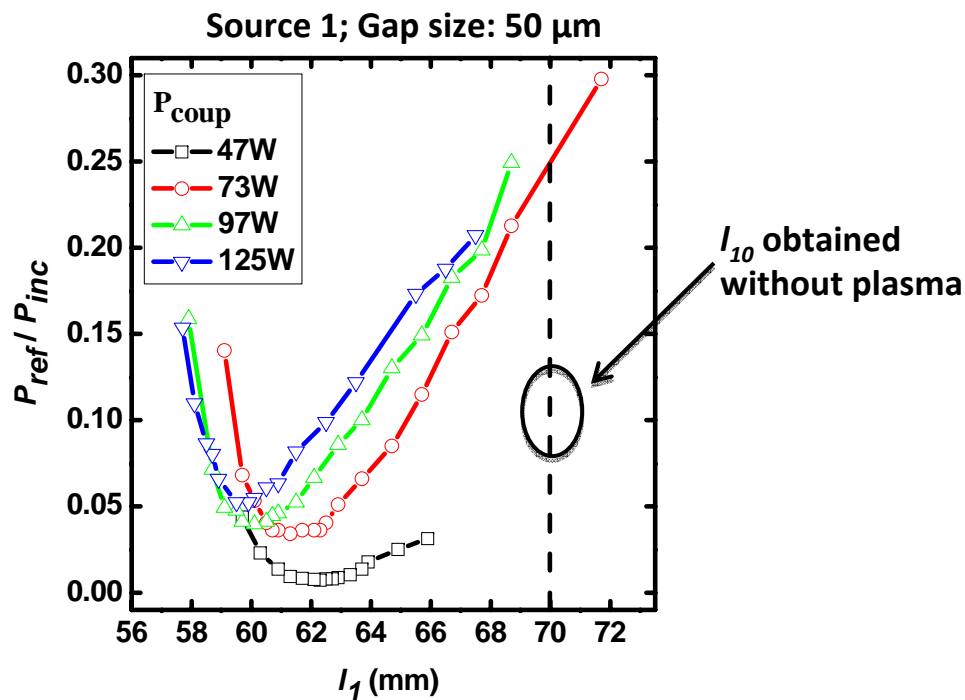


# microdécharges microondes de type stripline



## Ligne microstrip – couplage avec plasma

Utilisation d'un coupleur et d'un wattmètre : mesure  $P_{inc}$  et  $P_{ref}$



Plasma Impedance

$$Z_p = R_p + j|C_s \omega|^{-1} \quad C_s = \frac{\epsilon_0 A}{s}$$

Resistive part

Collisional energy losses in the plasma bulk.

Capacitive part

Capacitive behaviour of the space charge sheaths.

Inductive behaviour of the plasma bulk is neglected because electron-neutral collision frequency is much higher than the excitation frequency.

$$C_0 : C_L // C_P // C_S \Rightarrow f_0 \downarrow$$

$$P_{coup} \uparrow \Rightarrow \begin{cases} s \downarrow \text{ (Associated to with the higher } n_e) \\ A \uparrow \text{ (Plasma expansion)} \end{cases}$$

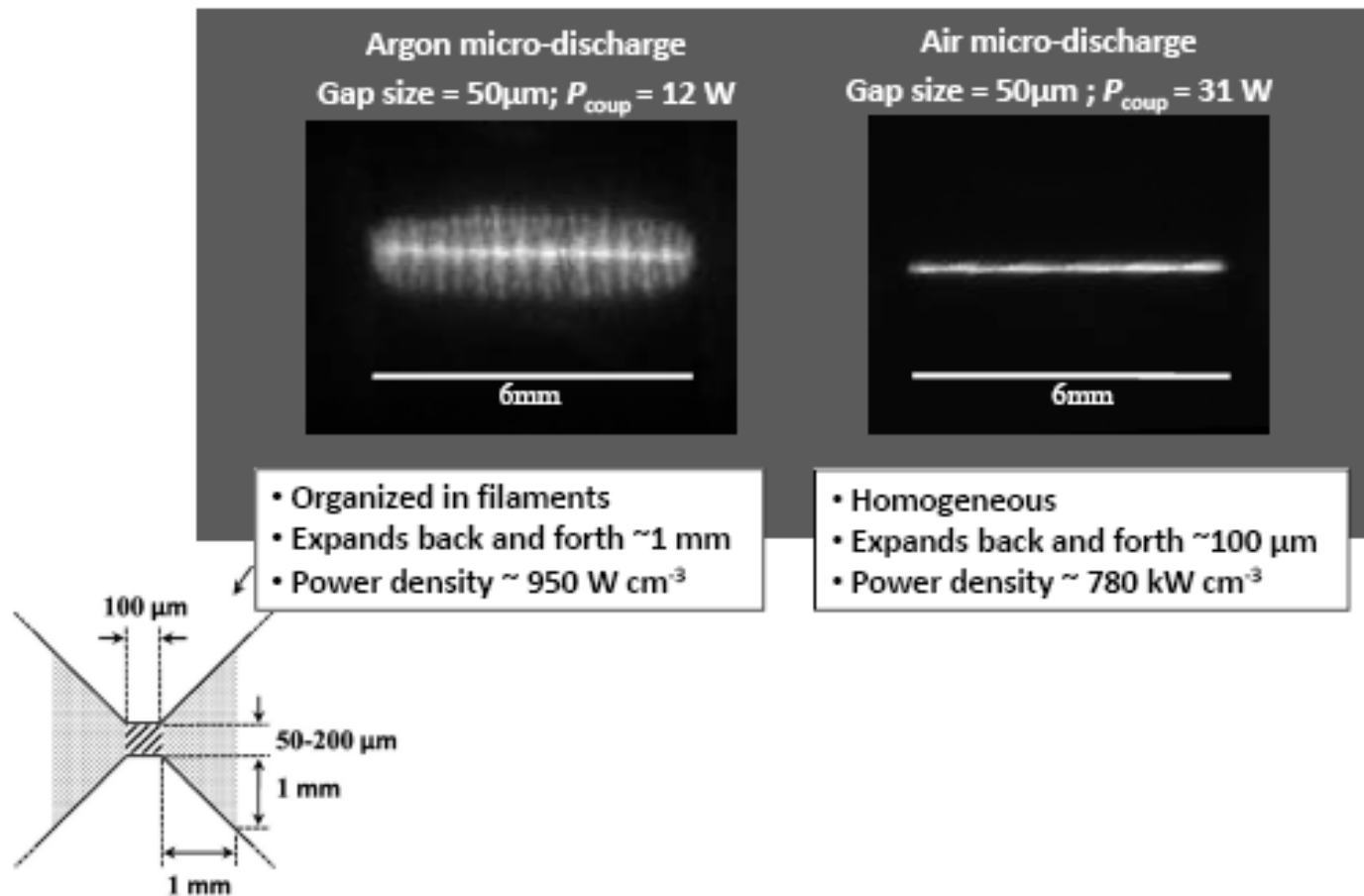
$$\Rightarrow C_s \uparrow \Rightarrow f_0 \downarrow$$

# microdécharges microondes de type stripline



## Ligne microstrip – quelques résultats

Imagerie (caméra CCD)



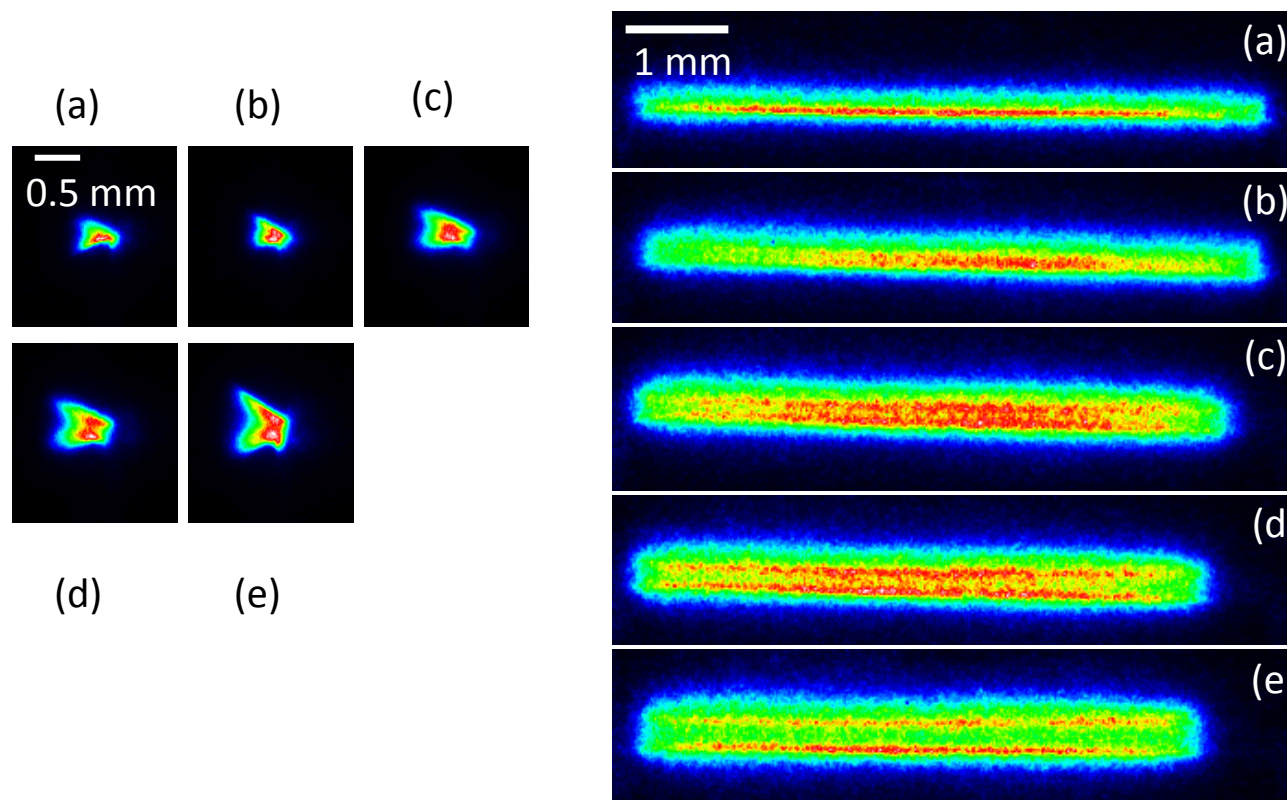
# microdécharges microondes de type stripline



## Ligne microstrip – quelques résultats

Imagerie (caméra CCD)

Source 2 - Hélium



écartement des fentes :

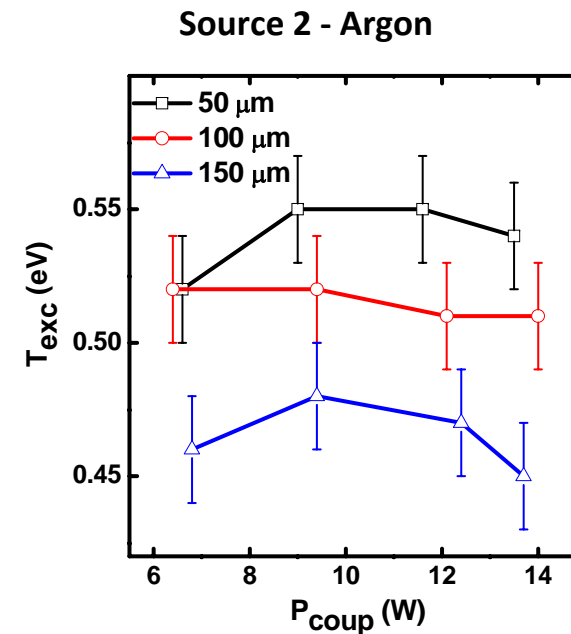
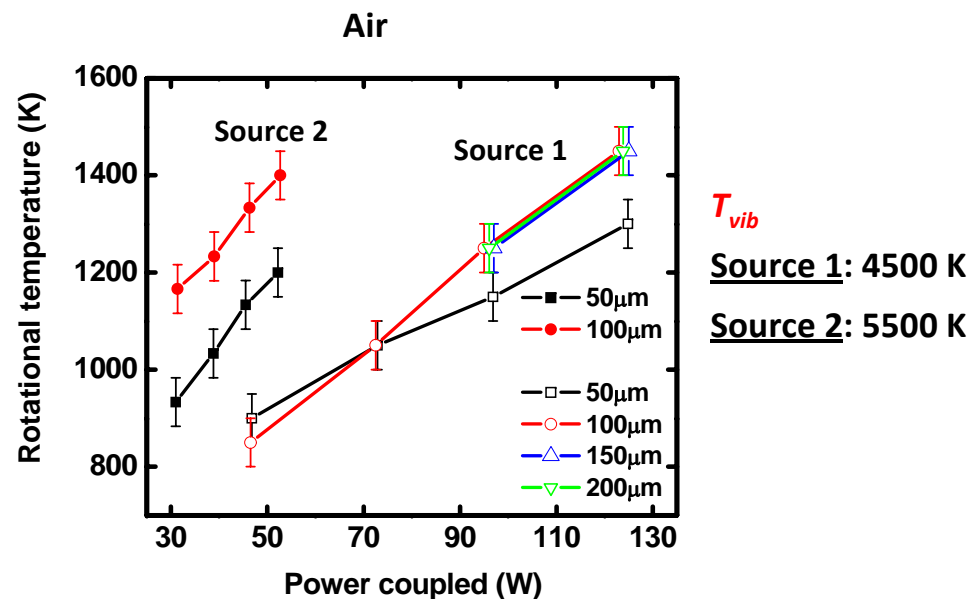
- a-> 50microns
- b-> 100microns
- c-> 150microns
- d ->200microns
- e -> 300microns

# microdécharges microondes de type stripline



## Ligne microstrip – quelques résultats

Spectroscopie d'émission : "températures" –  $n_e$  par élargissement Stark



Par largeur à mi-hauteur de  $H_\beta$  :  $n_e \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

# microdécharges microondes de type stripline



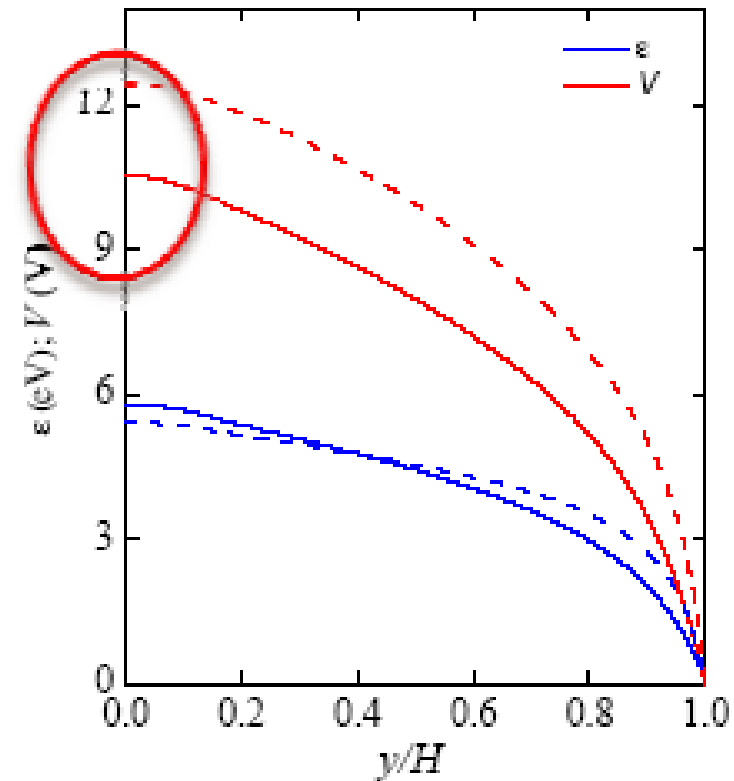
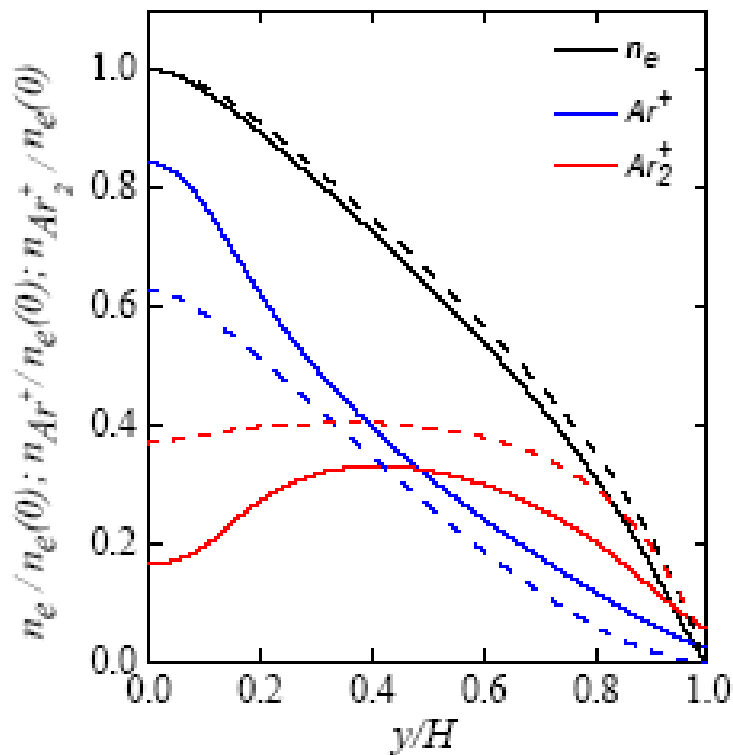
## Ligne microstrip – quelques résultats

Modélisation  
Argon

$p = 1 \text{ atm}$   
 $\omega/2\pi = 2.45 \text{ GHz}$   
 $n_e(0) = 5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$   
 $\langle T_g \rangle = 600 \text{ K}$

$2H = 50 \mu\text{m}$  ———  
 $2H = 200 \mu\text{m}$  - - - - -

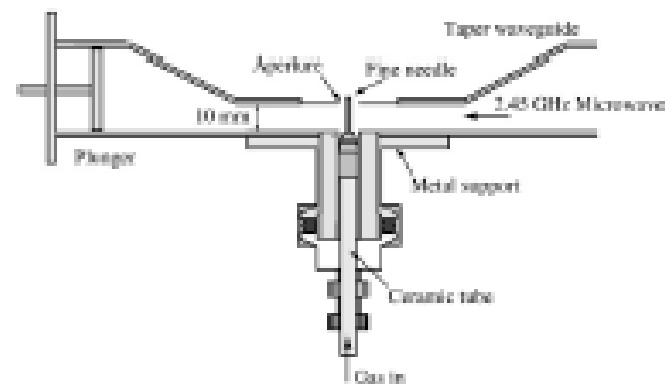
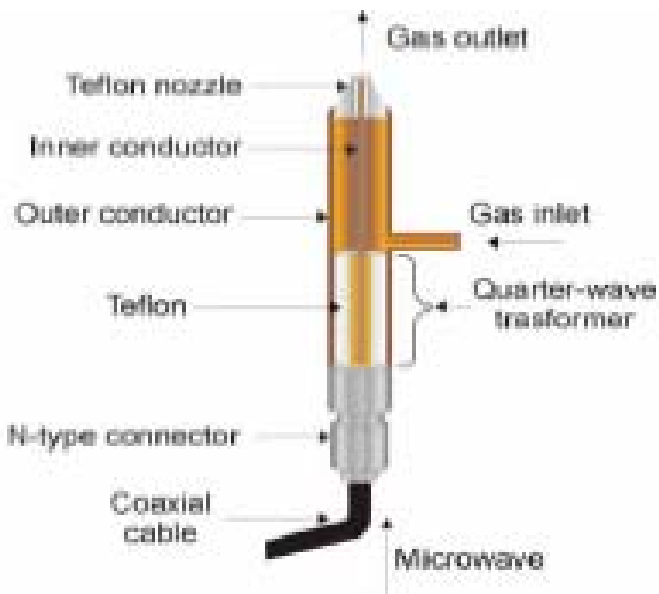
$p \cdot 2H \sim 4 - 15 \text{ Torr cm}$



# microdécharges microondes de type coaxial



## Ligne coaxiale : microplasma jet



Zakrzewski  
(Pologne)



Kanazawa  
(Japon)

