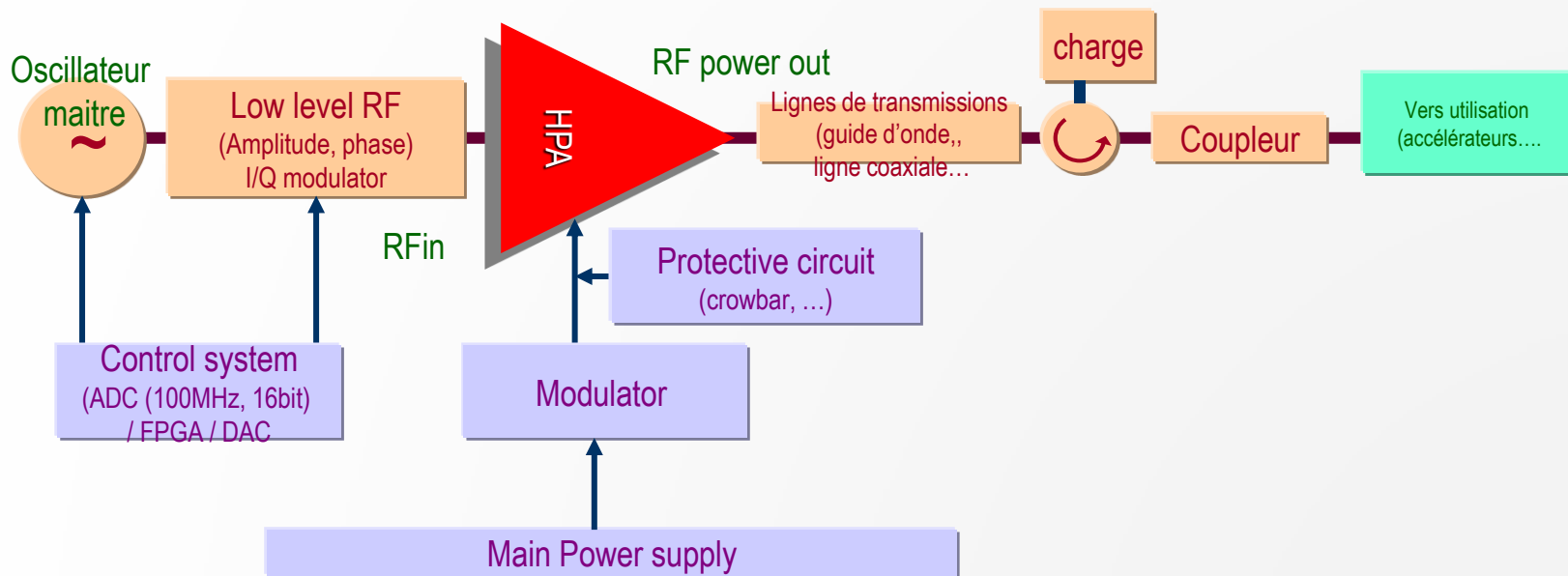


Sources RF

## Périmètres des sources RF: (exemple)



Source RF (périmètre global)

## Quelques notions à retenir (détails planches suivantes):

- Unité le Watt (et dans les accélérateurs plus souvent en kW et MW)
- Utilise aussi le dBm ( $0\text{dBm}=1\text{ mW}$ )
- Gain (dB)=  $10\log_{10}(P1/P2)$  pour les puissances
- Gain (dB)=  $20\log_{10}(V1/V2)$  pour les tensions

Continu (cw) et pulsé

Source RF comprends le composant lui-même mais également toute les éléments nécessaires à son fonctionnement (alimentations, refroidissement CC etc....)

## Quelques notions à retenir (détails planches suivantes):

- Bilan de puissance:

$$P_{rf\ in} + P_{secteur\ in} = P_{RF\ out} + \text{Heat}$$

⇒ Tous les watts qui ne sont pas de la RF ne servent qu'à chauffer l'air ou l'eau.

⇒ Et même ceux qui sont de la RF finissent souvent par le faire....

- Efficacité (efficiency):

- $\frac{P_{RFout}}{P_{RFin} + P_{sectin}} \approx \frac{P_{RFout}}{P_{sectin}}$  (pour les sources de fort gain, cas des accélérateurs)

## Déclinaison des dB

Gain (dB)=  $10 \cdot \log_{10}(P1/P2)$  pour les puissances

Donc:

10 dB gain de 10

20 dB gain de 100

30 dB gain de 1000

Etc...

si atténuation signe -:

-10 dB atténuation de 10

-20 dB atténuation de 100

-30 dB atténuation de 1000

Un chiffre courant - 3 dB = la moitié

## Déclinaison des dBm

dBm: sont les dB dont la référence est 1 mW

(1mW=0dBm,  $\log_{10}(1) = 0$ )

$$\text{dBm} = 10 \cdot \log_{10}(P/1\text{mW})$$

Donc:

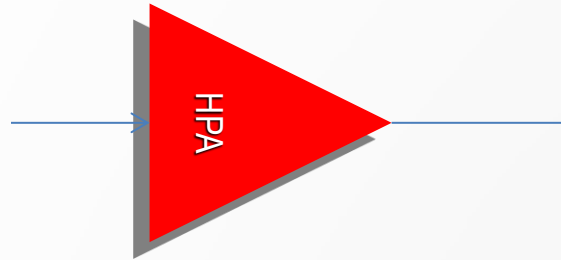
0dBm= 1mW

10dBm= 10 mW

20dBm=100 mW

1 W = 30 dBm

## Utilisation pratique:



Puissance d'entrée:

100 W

200 W

10 dBm

Gain:

20 dB

50 dB

30 dBm

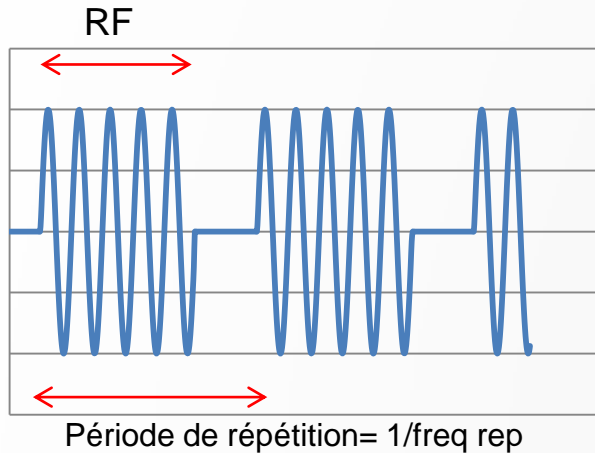
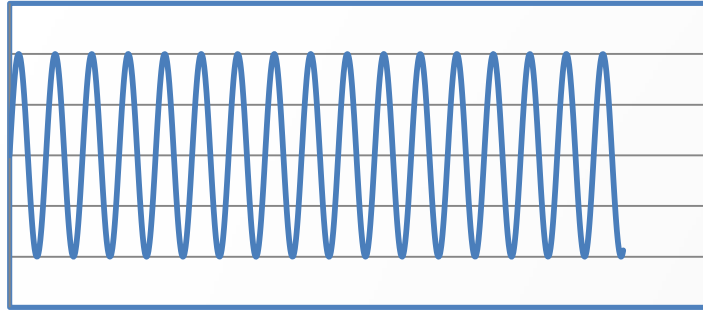
Puissance de sortie:

10 kW

20 MW

40 dBm (10 dBm+30dBm)  
 $\log(xy)=\log(x)+\log(y)$

# CW et Pulsé



- CW (RF permanente durant le fonctionnement):
  - Puissance=Puissance continue=puissance crête
- Pulsé:
  - Puissance Crête= Puissance lors du pulse
  - Puissance moyenne:
    - Pmoy=Pcrête\*Durée RF\*Fréquence de répétition
    - Duty cycle= Durée RF\* Fréquence de répétition (souvent exprimé en %)
- Dans tous les cas:  $\lambda = \frac{c}{f}$



## CW et Pulsé exemple numérique:

Puissance Crête	Fréquence de répétition	Largeur d'impulsion	Puissance moyenne	DU
10 MW	200 Hz	5 $\mu$ s	10 kW	1%
150 kW	4 Hz	1,7 ms	?	?

## Langage dans les bandes de fréquence:

RF (Radio Fréquence) , HF(Hyper Fréquence) ou Haute fréquence... tout le monde y met ce qu'il en a envie derrière, pas très clair, tout le monde applique un nom propre à son domaine.

Cependant il existe des classifications

# Langage dans les bandes de fréquence:

Ondes VLF (*Very Low Frequency*)

3 kHz à 30 kHz

Radiocommunications sous-marines militaires, systèmes de radionavigation, émetteurs de signaux horaires

Ondes LF (*Low Frequency*)

30 kHz à 300 kHz

Ondes électromagnétiques naturelles des orages terrestres, radiocommunications maritimes et sous-marines, transmissions par courant porteur, radiodiffusion en OL, émetteurs de signaux horaires, systèmes de radionavigation

Ondes MF (*Medium Frequency*)

300 kHz à 3 MHz

Systèmes de radionavigation, radiodiffusion en OM, radiocommunications maritimes et aéronautiques, radioamateurs, signaux horaires

Ondes HF (*High Frequency*)

3 MHz à 30 MHz

Radiodiffusion internationale, radioamateurs, radiocommunications maritimes et aéronautiques, radiocommunications militaires et d'ambassades, transmissions gouvernementales, signaux horaires, CB en 27 MHz **CYCLOTRON**

Cela fait bien dans les salons, mais bon ...pas trop utilisé, et en plus il y a des sous classes.

# Langage dans les bandes de fréquence:

Les **Bandes de fréquences de la télévision terrestre** sont situées dans la **bande** de radiofréquence comprise entre 30 et 3000 MHz regroupant les très hautes fréquences (VHF) et ultra hautes fréquences (UHF).

**Bande I**  
*de 47 à 68 MHz*

**Bande II**  
*de 87,5 à 108 MHz.*

*Cette bande est utilisée pour la diffusion de la radio en modulation de fréquence (appelée couramment «bande FM »).*

**Bande III**  
*de 174 à 230 MHz (174 à 223 MHz en France).*  
*Cette bande est utilisée pour la diffusion de la télévision*

**Bande IV**  
*de 470 à 606 MHz,*  
*utilisées pour la diffusion de la télévision analogique et digitale*

**Bande V**  
*de 606 à 862 MHz*

Pour la culture, très peu utilisé dans le monde des accélérateurs...  
Voir jamais.

# Langage dans les bandes de fréquence:

Le nom des plages de fréquences utilisées dans le monde des **radars** provient de la Seconde Guerre mondiale. En effet, pour garder secret le développement de ce système, les militaires ont décidé de donner à ces plages des noms de code qui sont demeurés en usage depuis.

Bande P	< 300 MHz	Primitif
Bande L	1 à 2 GHz	Long
Bande S	2 à 4 GHz	Short
Bande C	4 à 8 GHz	Compromis en S et X
Bande X	8 à 12 GHz	
Bande Ku	12 à 18 GHz	Under K
Bande K	18 à 27 GHz	de l'allemand Kurtz (court)
Bande Ka	27 à 40 GHz	Above K
Bande Q	40 à 60 GHz	
Bande V	50 à 75 GHz	
Bande E	60 à 90 GHz	
Bande W	75 à 110 GHz	

Vous n'êtes pas obligé de retenir toutes les bandes mais dans les accélérateurs vous serez amené à rencontrer les bandes L, S C ou X et là, il vaut mieux les retenir (linac) pour les machines circulaires basses fréquences je n'ai en ce qui me concerne jamais rencontré quelqu'un parlant de bande P. Mais ça peut changer.

Bien évidemment le mieux pour être précis c'est de préciser la fréquence exacte

En plus, il y a les fréquences américaines et européennes exemple en bande S à 3 GHz:  
Américaine: 2856 MHz  
Européenne: 2998 MHz

Enfin, valeur arrondies et en plus attention en Europe on trouve la fréquence américaine et aux US vous pouvez trouver l'europpéenne!!!!

Bref, le mieux utilisez la fréquence exacte...

## Bestiaire des sources de puissance:

Vous allez dans les accélérateurs trouver trois grandes familles de source RF de puissance:

- Les amplis état solide: (SSPA, Solid State Amplifier)
- Les tubes à grilles 'tétrodes, diacrodes, IOT (Inductive Output Tubes)
- Les Klystrons et occasionnellement les magnétrons.

Bien que n'étant pas une source à proprement parler vous trouverez également les compresseurs d'impulsions et il existe d'autres sources RF mais qui ne sont pas utilisées dans les accélérateurs.

## Bestiaire des sources de puissance:

Bien évidemment ces technologies ne viennent pas de nul part:

- Chacune a ses limites en fréquence, en puissance (crête ou moyenne), en prix (oui c'est important), en mise en œuvre....
- Les sources RF sont pilotées par les technologies existantes en fonction des fréquences et des puissances.
- Puisqu'elles doivent couvrir une très grande gamme de fréquence et puissance typiquement de quelques dizaines de MHz à quelques GHz et quelques kW à quelques MW

## Technologies:

- Solid state

- LDMOS, GaN...

- Vacuum Tubes

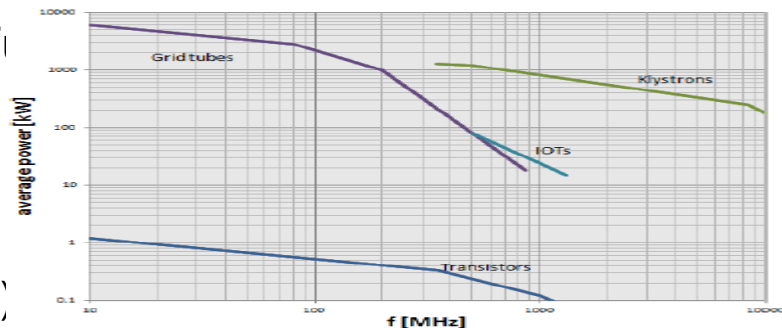
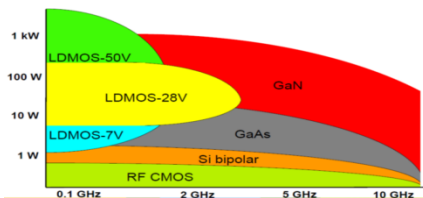
- Gridded tubes:

- Tetrodes diacodes, Inductive Output T

- Klystrons

- Magnetrons

- Gyrotrons (not used for Particle accelerators)





## RF source, selon applications:

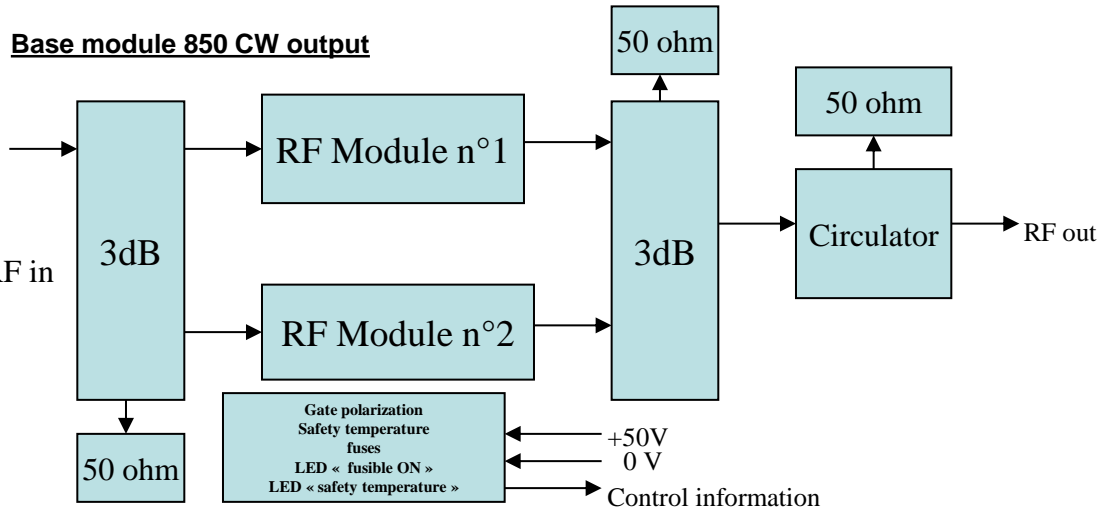
	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Cyclotrons</li> <li>❖ Synchrotrons (protons, ions)</li> <li>❖ Rhodotrons</li> <li>❖ Ion LINAC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Synchrotrons (electrons)</li> <li>❖ CW proton LINAC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ ERL</li> <li>❖ Microtrons</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Pulsed proton LINAC</li> <li>❖ IR/X-FEL</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Electron LINAC</li> </ul>
<b>Main solution</b>	<b>Tetrodes</b>	<b>Klystrons</b>	<b>IOT, Klystrons</b>	<b>Klystrons</b>	<b>Klystrons</b>
Alternatives	SSPA, klystrons	IOT, SSPA, tetrodes	SSPA ?	MBK, tetrodes, MBIOT	Magnetrons (Industriels et médiac)
<b>CW or pulsed</b>	CW / pulsed	CW	CW	Pulsed > 100µs	Pulsed < 10µs Chaud Gamme > 1ms cryo
<b>Freq. range</b>	1-200 (→800) MHz	(100←) 350-700 MHz	L/S/C-band	(200←) 324-1300 MHz	S (L, C, X)-band

## SSPA:

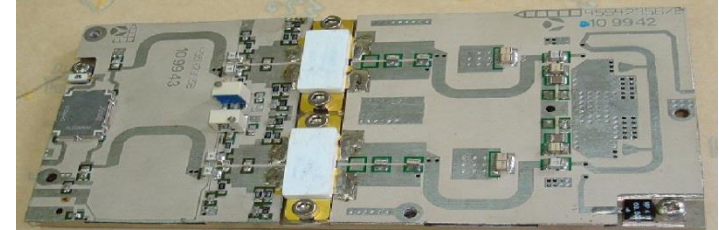
- Solid state amplifiers: basés sur la combinaison de modules unitaires de façon à obtenir la puissance voulue. Les modules unitaires sont dans la gamme de quelques centaines de Watt.
- Précautions particulières:
  - Protection: protection contre le réfléchi
  - recombinaison

# SSPA exemple de module individuel:

## RF base Module 850CW @ 700MHz



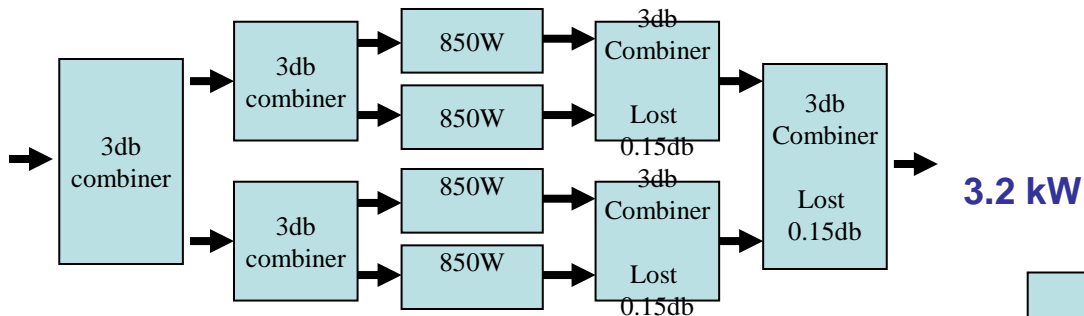
## Example RF base module 300W@500MHz



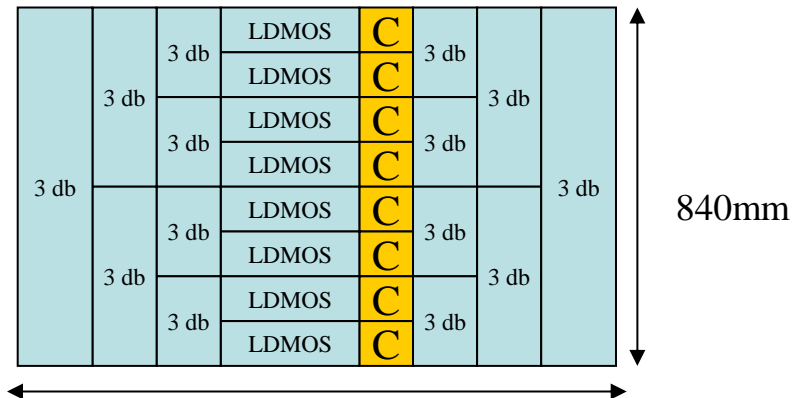
- None adjusting RF
- 90% CMS devices
- Last generation Technologies Transistors
- RoHS compliant

# SSPA:

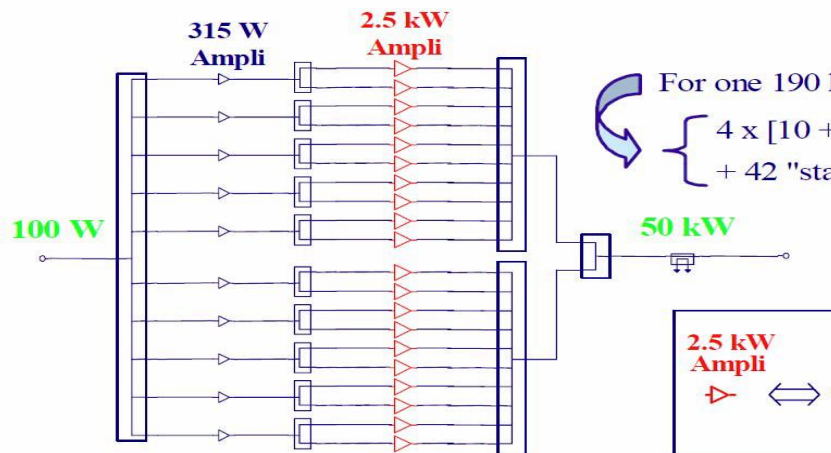
**3.2 kW CW @ 700MHz base block**



Bloc diagram for 3.2 kW



# SSPA exemple SOLEIL ampli 352 MHz et 180 kW:



For one 190 kW ampli → x 4

$$\left\{ \begin{array}{l} 4 \times [10 + (20 \times 8)] + 2 \\ + 42 \text{ "stand-by"} = 724 \end{array} \right.$$

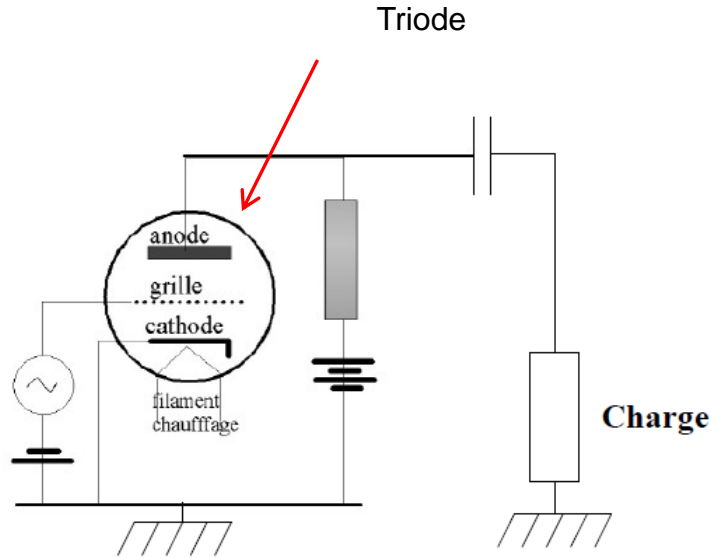
2.5 kW Ampli



## SSPA:

Advantages	Disadvantages
Low voltage (<100 V)	Losses in combiner
Graceful degradation	Low efficiency
High reliability(to be though during design)	Cost
High stability	Complexity
No warm up	High $RI^2$ losses
Easy maintenance (to be though during design)	Limited power and frequency (100 kW, few hundreds of MHz)
Increasing power and frequency	

## Triodes et tétrodes:



Triode a donc trois « xode »

1 Cathode

1 grille

1 anode

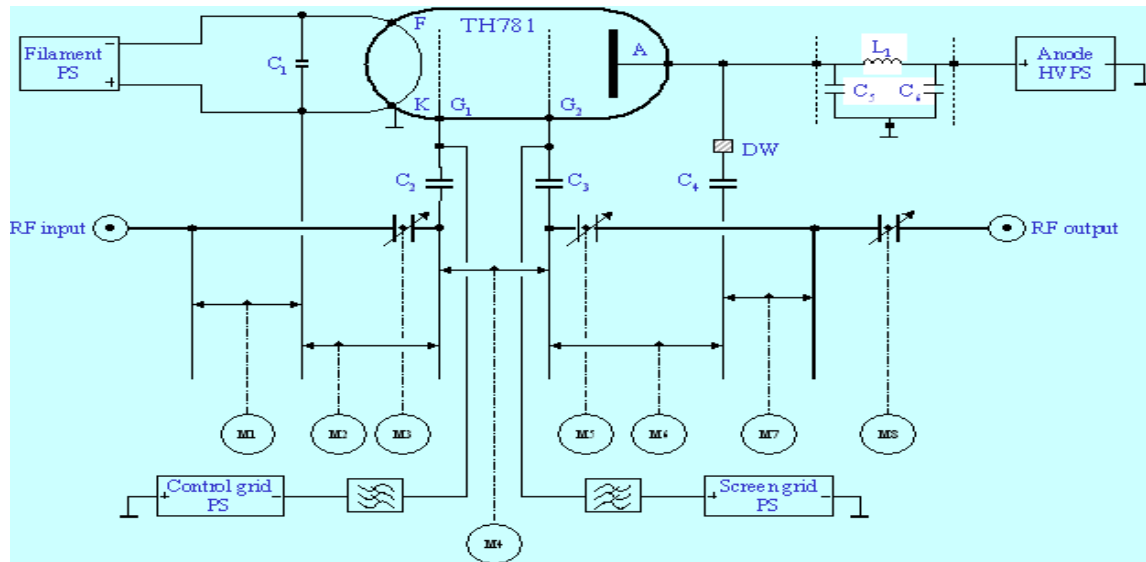
Dans les tubes de puissances, la grille est une grille au sens physique du terme (maillage) permettant de contrôler les courants circulants entre la cathode et l'anode.

## Triodes et tétrodes:

- Cependant pour monter en puissance, fréquence et mieux contrôler le comportement du tube, on peut rajouter une grille (Tétrode)
  - la grille supplémentaire agit comme un écran électrostatique diminuant la capacité grille-anode permettant la montée en fréquence
- ou en faire une diacrode (planches ultérieures)
- Tous les tubes à Grilles, nécessitent une cavité permettant le fonctionnement à la fréquence désirée, cette cavité étant externe au tube.
- En fonction des différentes tensions appliquées aux grilles ou à l'anode, les courants seront différents. Ces caractéristiques intrinsèques sont des données constructeur qui accompagnent le tube.
- Sur le principe le schéma électrique est simple dans la réalité c'est un peu plus compliqué, il faut :
  - Découpler les différents éléments entre eux (bloquer notamment les courants RF qui pourraient perturber les alimentations et le tube lui-même sur certaines parties)
  - Permettre le couplage RF d'entrée et de sortie...



## Schéma de connexions des tétrodes:



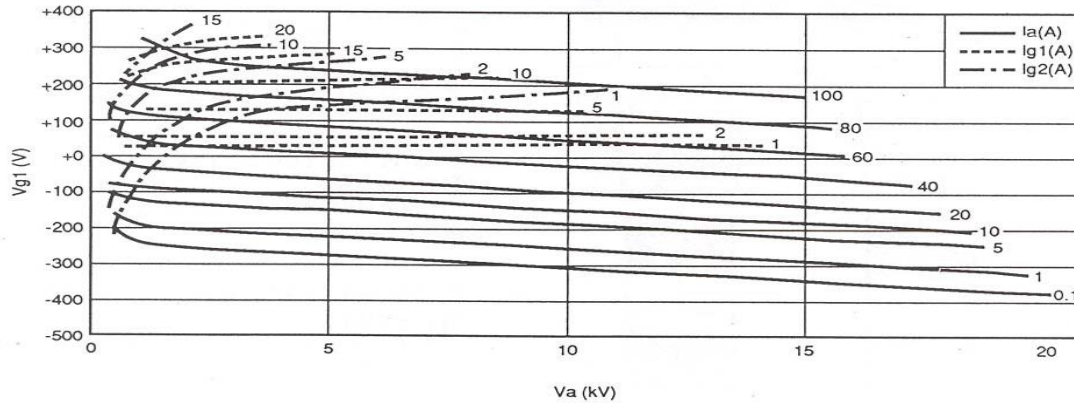
Cathode grounded

CW In class B operation  
(180° conduction, typical  
gain:  
12 dB and efficiency  
65%

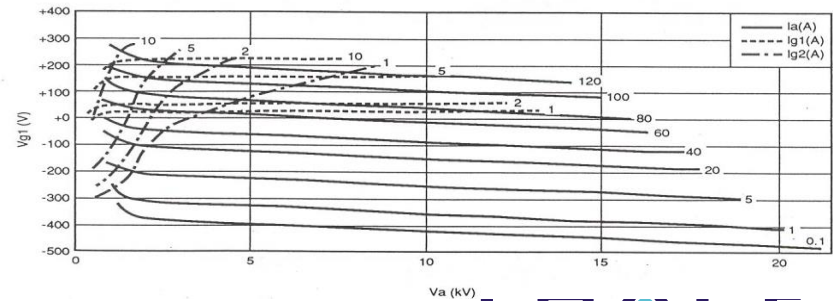
A	Anode connection	L <sub>1</sub>	HV filter inductance
G <sub>2</sub>	Screen grid connection	DW	Damping waveguide
G <sub>1</sub>	Control grid connection	M1	Motor for second input tuning
K	Cathode connection	M2	Motor for first input tuning
F	Filament connection	M3	Motor for input coupling capacitor
C <sub>1</sub>	Filament-cathode decoupling capacitor	M4	Motor for neutralization
C <sub>2</sub>	Control grid decoupling capacitor	M5	Motor for primary output tuning
C <sub>3</sub>	Screen grid decoupling capacitor	M6	Motor for primary to secondary output coupling
C <sub>4</sub>	Anode decoupling capacitor	M7	Motor for secondary output tuning
C <sub>5</sub>	HV filter capacitor	M8	Motor for output load coupling
C <sub>6</sub>	HV filter capacitor		

# Exemple de caractéristiques des Tétrodes:

**CONSTANT CURRENT CHARACTERISTICS**  
 $V_{g2} = 1000 \text{ V}$

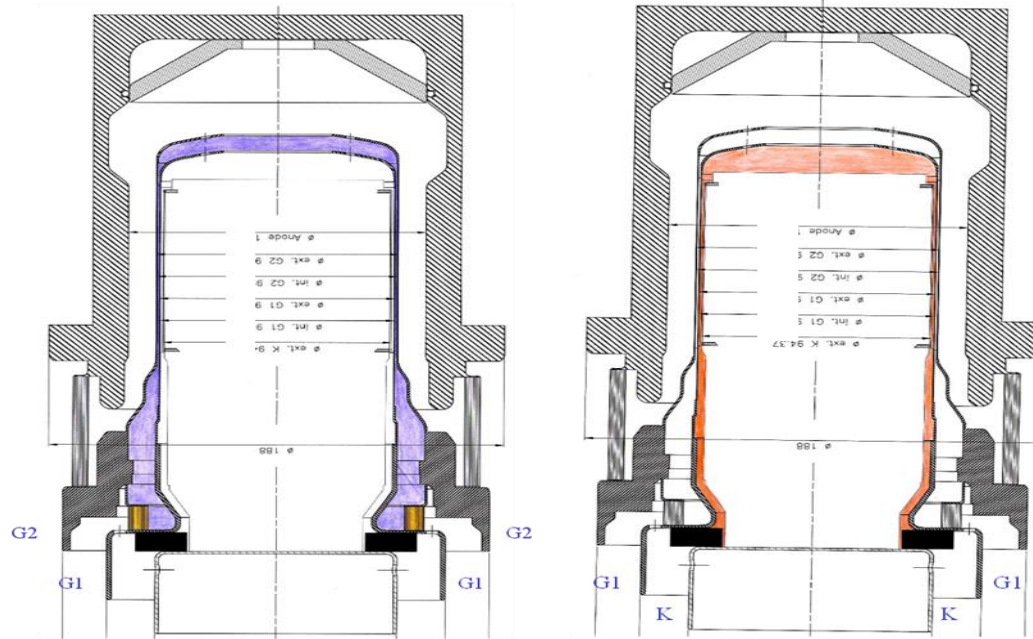


**CONSTANT CURRENT CHARACTERISTICS**  
 $V_{g2} = 1500 \text{ V}$

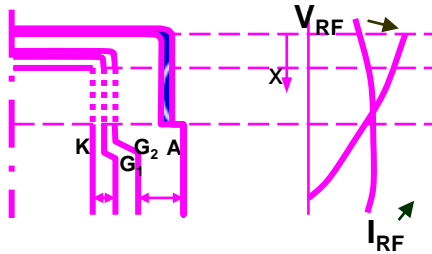


# Tétrodes:

## Tetrode construction example



## Diacrodes intérêt par rapport aux tétrodes:



# Limitation des tetrodes

$$\text{Losses on grid} : P \sim V_{RF}^2 F^{5/2} \cdot x^2$$

The ratio between the tube dimensions and the wavelength at the operating frequency determines the distribution of voltage and current along the electrodes.

This has two consequences :

a. The voltage distribution inside the tube acts directly on the tube's performances. From the top to the bottom of the active part, each centimeter of the cathode does not deliver the same amount of electrons, therefore the electron flow and the dissipated power are not constant.

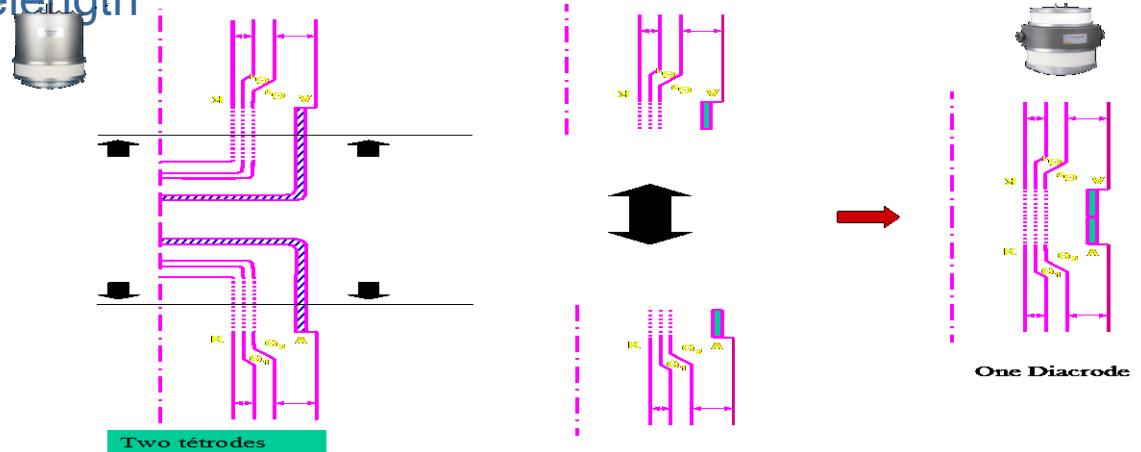
Then, at least, the tube is not used with a maximum efficiency.

b. The current distribution (reactive current) generates a non-uniform RF losses distribution along the grid with a maximum at the bottom of the latter. Therefore the grid temperature and indirectly the temperature of the other pieces increase, bringing its troop of difficulties (trips, outgassing, temperature of the connections, thermal emission, etc).

## Diacrodes intérêt par rapport aux tétrodes:

The way to reduce the RF losses and balance the electronic flow is to put the maximum RF voltage in the middle of the tube active part. This leads to double ended grid tube and the necessity of tuning the device in half wavelength

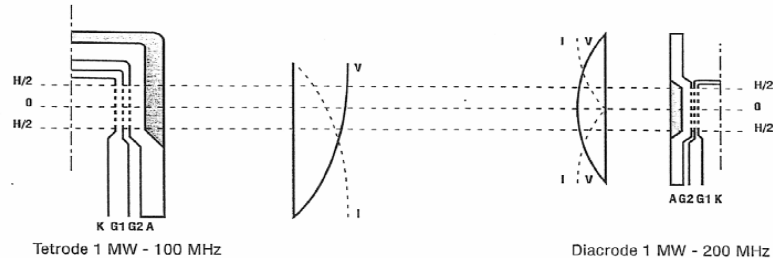
The diacrode concept :  
The doubled ended tetrode



From an electronic point of view a diacrode is a tetrode with double-ended connections.

# Diacrodes intérêt par rapport aux tétrodes:

Tetrode to Diacrode evolution



Anode  
Connections



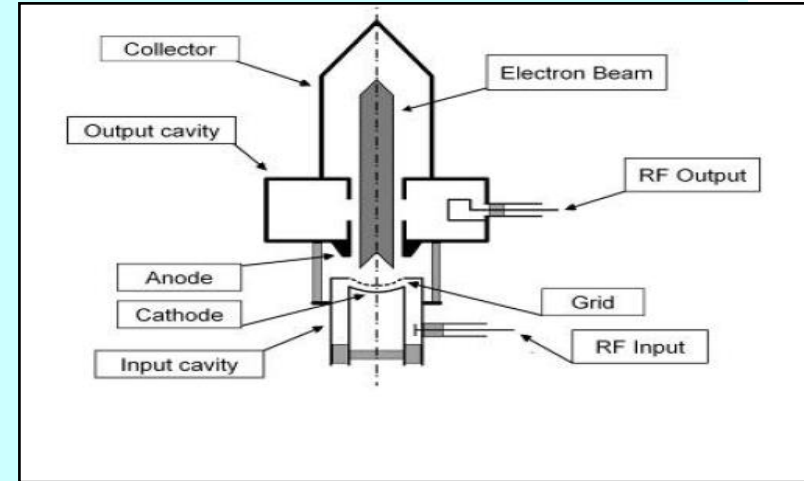
For the same length of the active part of the electrodes, this design allows a reduction of the RF losses by a ratio of nearly four compared to a conventional tetrode. Hence the possibility to increase the allowed pulse length, the duty factor or the frequency

IOT (Inductive Output Tube):

IOT

# IOT (Inductive Output Tube):

- IOT principle:
  - Axial magnetic field
  - Anode voltage constant
  - Bunched electron induce current in output cavity
  - Large collection area for beam interseption
- Typical gain:
  - 20 dB
  - Efficiency  $\cong 65\%$
- Limitation on power by the grid dissipation.
  - In order to avoid this limitation MBIOT studies will begin





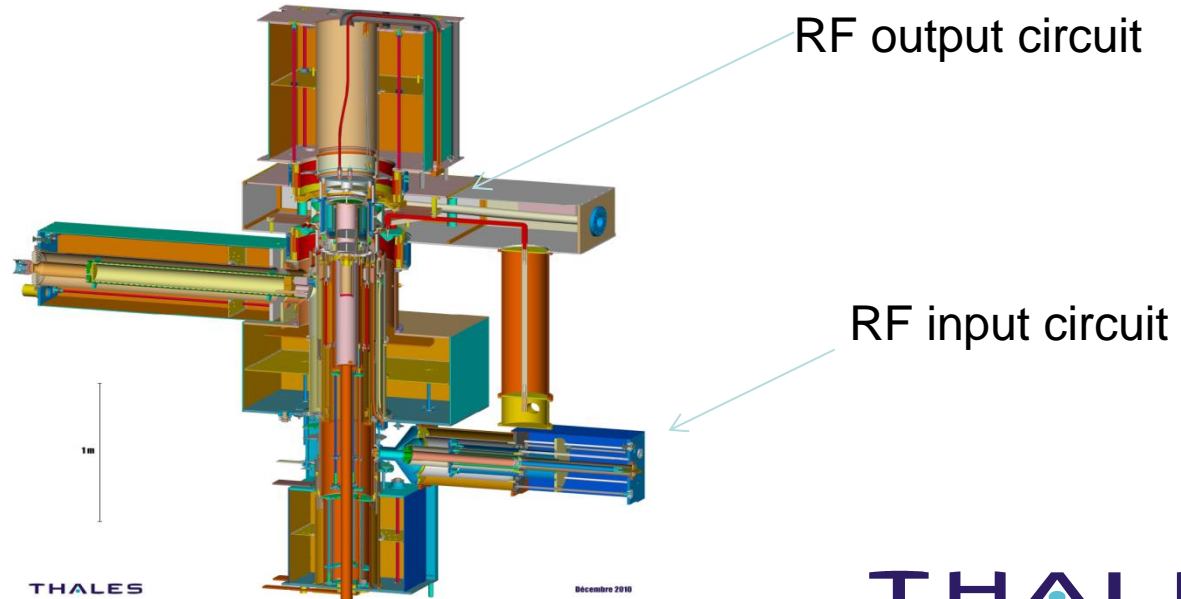
## IOT (Inductive Output Tube) exemple de performances:



Frequency	267	500	1300	MHz
Beam voltage	67	40	25	kV
Beam current	6.0	3.5	1.0	A
RF output power	280	90	16	kW
Efficiency	70	>65	62	%
Gain	22	>22	21	dB

## Exemple cavités associées aux tubes à grilles:

- In order to be operated all gridded tubes must have input and output cavities designed for the working frequency. (and power) high power stage (exemple: diacrode @ 1.5 MW from 35-65 MHz, 3600s)



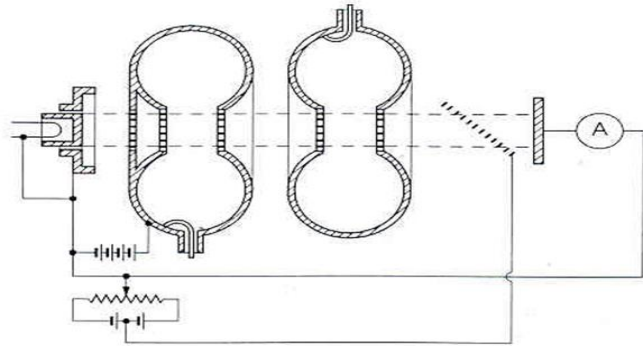
Klystrons:



Klystrons

# Klystrons:

In 1937 **Varian** brothers applied for a patent on a microwave source using velocity modulation and resonant cavities : the klystron



## A High Frequency Oscillator and Amplifier

RUSSELL H. VARIAN AND SIGURD F. VARIAN  
*Stanford University, California*

(Received January 6, 1939)

A d.c. stream of cathode rays of constant current and speed is sent through a pair of grids between which is an oscillating electric field, parallel to the stream and of such strength as to change the speeds of the cathode rays by appreciable but not too large fractions of their initial speed. After passing these grids the electrons with increased speeds begin to overtake those with decreased speeds ahead of them. This motion groups the electrons into bunches separated by relatively empty spaces. At any point between the grids, therefore, the cathode-ray current

can be resolved into the original d.c. plus a nonsinusoidal a.c. A considerable fraction of its power can then be converted into power of high frequency oscillations by running the stream through a second pair of grids between which is an a.c. electric field such as to take energy away from the electrons in the bunches. These two a.c. fields are best obtained by making the grids form part of the surfaces of resonators of the type described in this Journal by Hansen.

# elementary description of the klystron

- What are the differences between klystrons and gridded tubes ( triodes and tetrodes )?
  - The shape of the cavity and of the electromagnetic field inside the cavity
  - The shape of the beam and the use of magnetic focussing for klystrons .
  - There is no RF modulation of the current emitted by the cathode of the klystron
  - the separation of the functions
  - The ability to get much higher gain with klystron than with triodes
  - Klystrons have RF input and output ports which can be directly connected to transmission lines ( coaxial or waveguide )

# Klystrons:

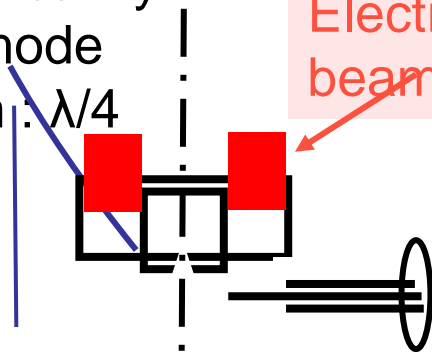
## Different shapes of cavity

### triode

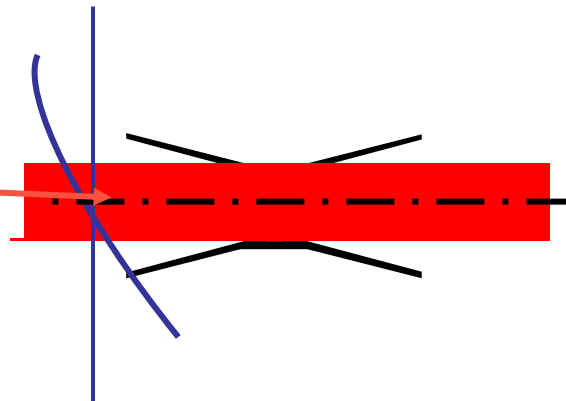
coaxial cavity

TEM mode

Length:  $\lambda/4$



Electron beam



### Klystron

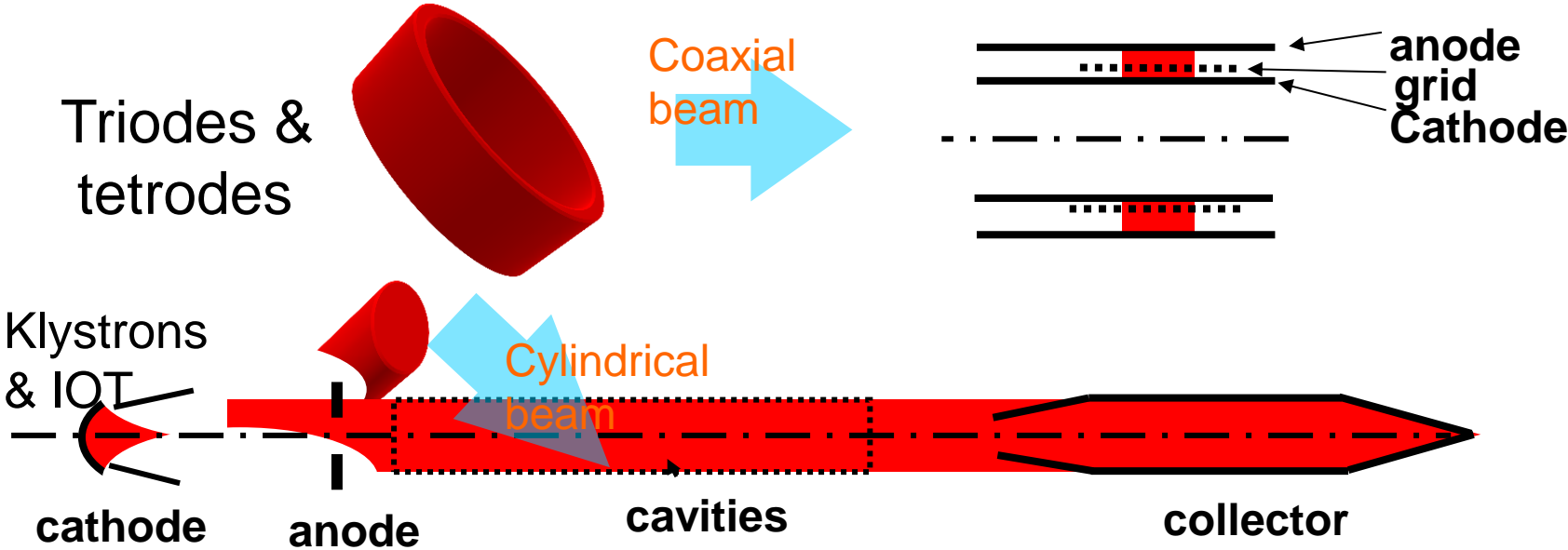
Pill box cavity with noses

TM<sub>01</sub> mode

Diameter:  $\lambda/2$

# Klystrons:

Different shapes of electron beam



Triodes & tetrodes

Klystrons & IOT

Components & Subsystems

## Klystrons:

- An un-modulated electron beam passes through a first cavity with RF Input
- Beam is velocity modulated (e- are accelerated or retarded according to the phase of the gap voltage:
- As the beam drifts downstream bunches of electrons are formed as shown in the Applegate diagram and so on
- An output cavity placed downstream extracts RF power



## Klystrons:

- In order to increase gain, efficiency and bandwidth, additional cavities are used. Typically a klystron has 5 to 6 cavities including input and output cavity with an intermediate one at the first harmonic frequency in order to increase bandwidth
- Bunches are formed by all the first cavities and power is extracted at the last one.
- Electron gun is a space-charge limited diode with perveance given by  $K = \frac{I}{V^{3/2}}$
- $K \times 10^6$  is typically 0.5 - 2.0 ( $\mu$ Perveance)
- Beam is confined by an axial magnetic field (solenoid or PPM)

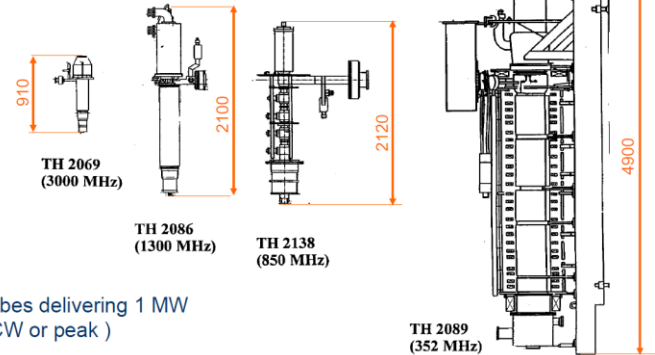
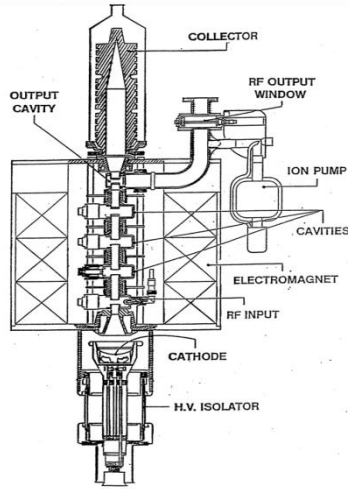
# Klystrons:

Description of a high power klystron

the collector

the interaction structure and the beam focusing system

the electron gun :  
emission , shaping and  
acceleration of the beam



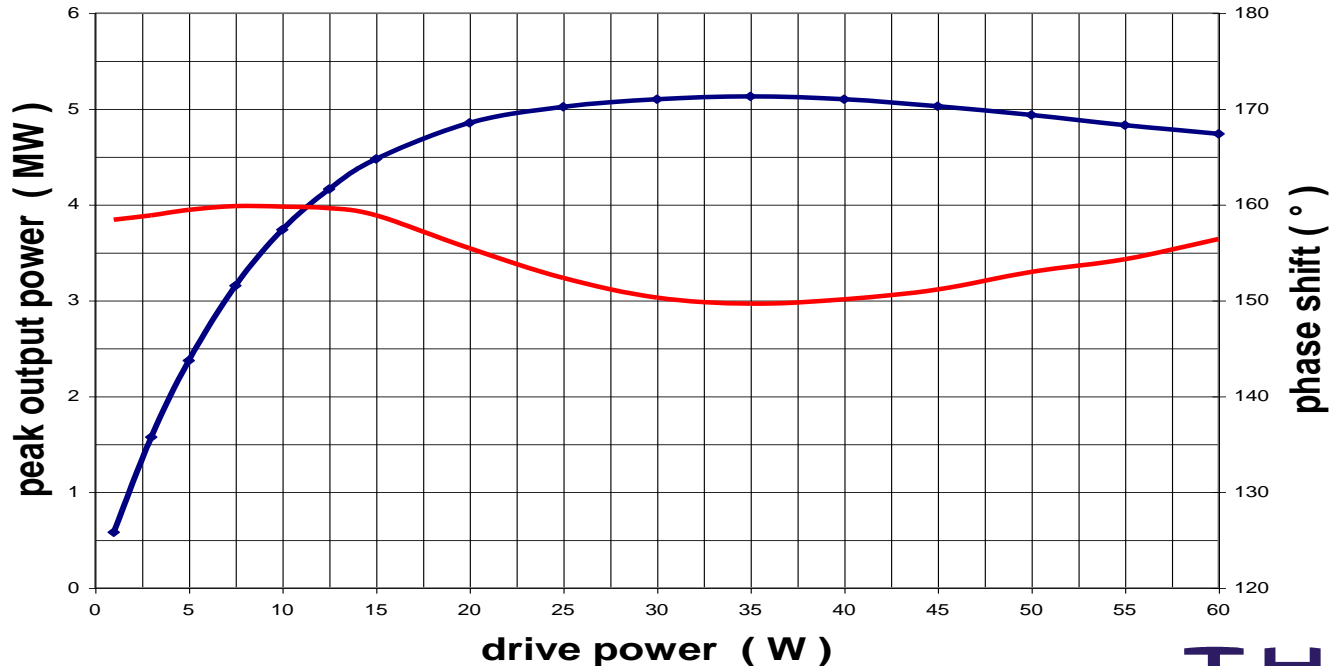
Tubes delivering 1 MW  
( CW or peak )

# klystron operation principle

- the electric field in the gap of the first cavity
- velocity modulation in the first cavity
- beam modulation ( current and velocity ) in the first drift tube
- induced current and modulation in the other cavities
- beam bunching , velocity and current modulation from input to output cavity
- output power

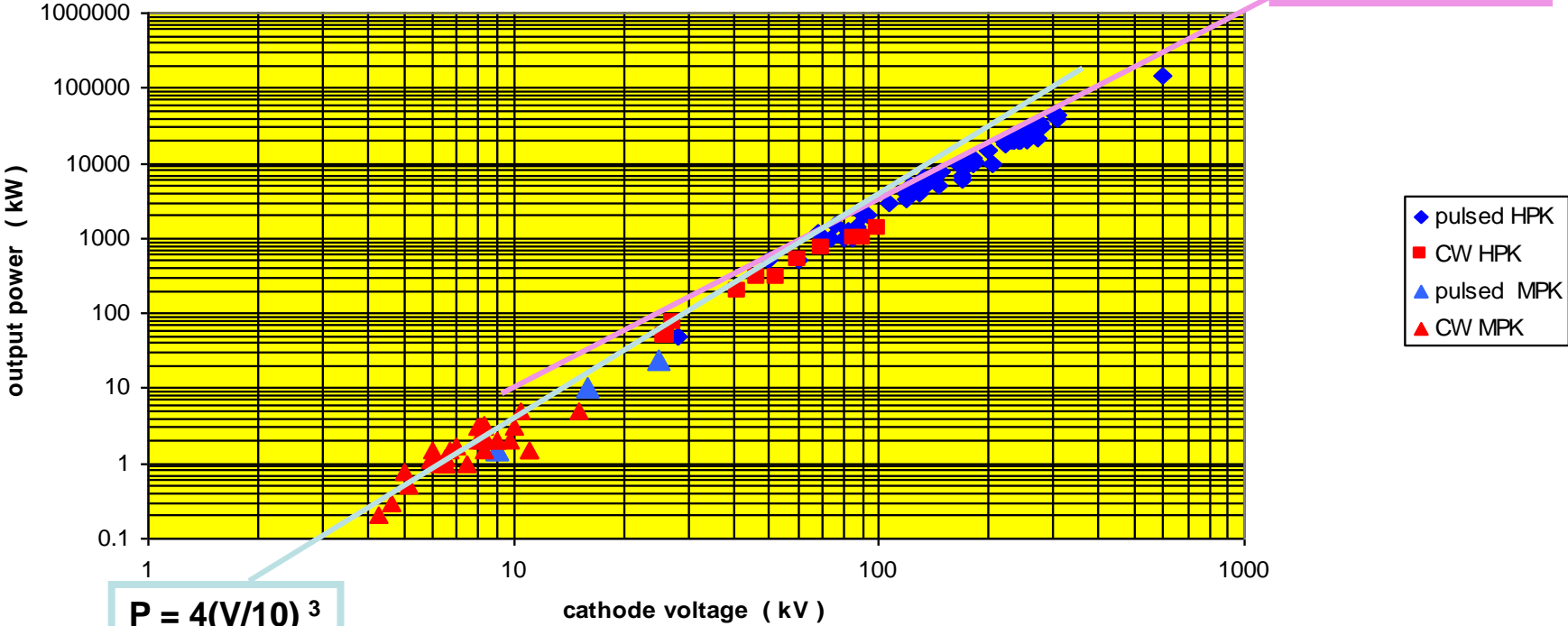
# Klystrons:

Computed output power and phase versus drive power



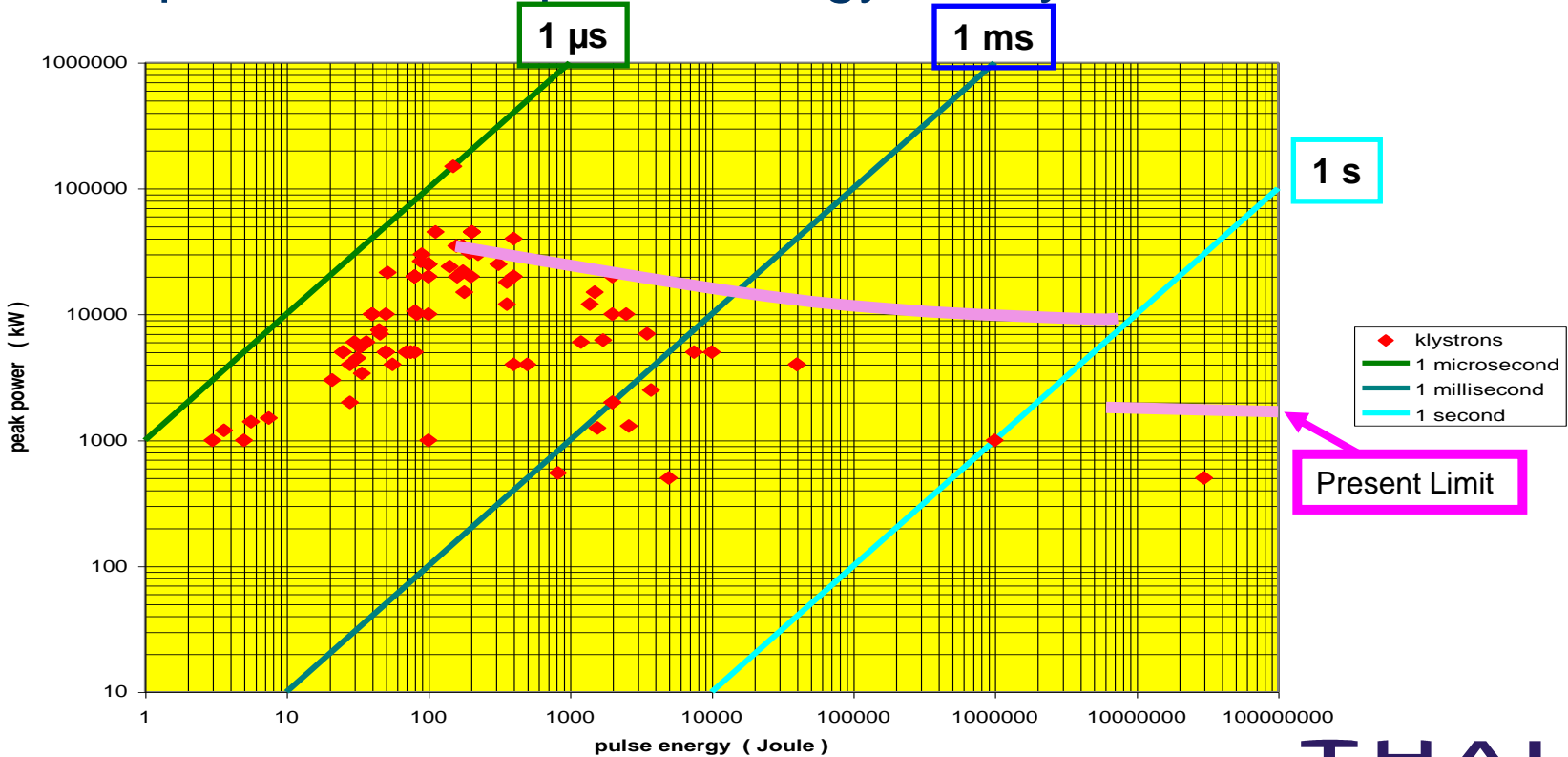
# Klystrons:

output power versus cathode voltage for medium and high power klystron



# Klystrons:

## Peak power versus pulse energy for klystrons



# Compresseurs d'impulsions:

- **Pulse compressor : why?**

In order to have an higher electric field, RF energy is compressed

- **Principle of operation :**

A high order mode cavity is filed during RF generation and RF phase is changed rapidly at the entrance of the cavity when enough energy is stored in this cavity resulting in a higher peak power from this cavity. An phase compensation could be done in order to have a flat top pulse

### SLED, LIPS or CIDR cavities

- ✓ 2 cavities mode: H038, 2 coupling holes/cavity
- ✓  $Q_0$  : 180000
- ✓  $\beta=Q_0/Q_L$  : 9
- ✓ Cavity dimensions:  $\Phi = 444 \text{ mm} \times L = 575 \text{ mm}$

### BOC cavities (Barrel Open Cavities)

- ✓ mode  $TM_{26,1,1}$
- ✓  $\lambda/4$  coupler
- ✓ up to  $26 \times 4 = 104$  coupling holes
- ✓  $\beta=Q_0/Q_L$  : 8

