

Performances des klystrons : état de l'art et limites

A.J. Durand et R. Marchesin

LAL, Orsay, le 27 octobre 2011



Microwave & Imaging Sub-Systems - RFM-Vélizy -

Contenu de la présentation

- 1. présentation du klystron
- 2. exemples de klystrons pour applications scientifiques
- 3. les effets de la charge d'espace :
- 4. limites de puissance crête et d'énergie par impulsion
- 5. Limitations du rendement d'interaction
- 6. limites en puissance moyenne
- 7. Conclusions : axes de développement



La structure du klystron se décompose en trois parties dont les fonctions sont différentes :

- Le <u>canon</u> où les électrons sont émis par la cathode , accélérés par la différence de potentiel entre la cathode et l'anode et où le faisceau est mis en forme par la géométrie des électrodes et le champ magnétique.
- L'espace d'interaction où le faisceau est maintenu dans la forme adéquate (en général cylindrique) par un champ magnétique afin d'optimiser l'interaction avec l'onde stationnaire des cavités .
- Le <u>collecteur</u> qui recueille le faisceau d'électrons après interaction et convertit l'énergie résiduelle des électrons en chaleur qu'il faut évacuer par un système de refroidissement approprié .

Cette séparation des fonctions donne plus de liberté pour optimiser chaque partie . C'est pourquoi le klystron constitue le meilleur choix pour les accélérateurs de particules : il a un rendement élevé (jusqu'à 65 %), fournit de fortes puissances crête (jusqu'à 100 MW) et moyenne (jusqu'à 1,3 MW), avec un grand gain (40 à 60 dB), et sa faible bande passante n'est pas gênante pour des applications à fréquence fixe.



• Description d'un klystron de puissance

le collecteur

La structure d'interaction composée de cavités résonantes et du solénoïde pour la focalisation magnétique

> Le canon à électrons : émission , mise en forme et accélération du faisceau



Le champ électrique micro-onde entre les becs de la cavité d'entrée accélère les électrons pendant une alternance et les ralentit pendant l'alternance suivante. Il réalise une modulation de vitesse du faisceau.



Les électrons accélérés rattrapent les électrons ralentis pendant l'alternance précédente : il se produit un groupement en paquet (modulation de densité).

THALES

Calcul d'un klystron 6 MW bande S: trajectoires électroniques calculées à l'aide d'un code d'interaction 2D



6

Les courbes représentent la croissance du courant de modulation (harmoniques 1 à 4) en fonction de la distance (longueur des glissements en mm).



modulation de vitesse des électrons en fonction de la distance.



La taille des cavités et la longueur des tubes de glissement entre les cavités sont proportionnelles à la longueur d'onde. Les dimensions de la structure d'interaction augmentent lorsque la fréquence décroît.



La longueur des tubes de glissement entre les cavités est proportionnelle à la vitesse des électrons. La longueur de la structure d'interaction augmente lorsque la tension augmente.



klystron en impulsions courtes pour accélérateurs de particules



TH 2132		
puissance crête	:	45 MW
largeur d'impulsion	:	5 µs
puissance moyenne	:	20 kW
tension Cathode	:	308 kV

courant cathode: 337 Arendement: 44%

puissance d'entrée : 160 W

TH 2100

puissance crête	•	35 MW
largeur d'impulsion	:	4,5 µs
puissance moyenne	:	17,5 kW
tension Cathode	:	276 kV
courant cathode	:	285 A
rendement	:	45%
puissance d'entrée	:	180 W



TH 2104 : klystron bande L (1,3 GHz) en impulsions longues

On peut augmenter la largeur d'impulsion en réduisant la puissance crête

tension cathode	courant faisceau	puissance crête	durée d'impulsion	puissance moyenne
kV	Α	MW	μs	kW
200	179	15	100	50
165	135	10	250	250
130	94	5	600	150



	TH 210		
klystrons en continu	puissance	: 0,5 MW	
	Fréquence	:3,7 GHz	
	tension Cathode	: 60 kV	
	courant cathode	: 19,5 A	
TH 2089	rendement puissance d'entrée	: 43 % e : 6 W	
puissance : 1,3 MW	1		
Fréquence : 352 MHz			
tension Cathode : 100 kV			
courant cathode : 20 A			
rendement : 63 %			
puissance d'entrée : 75 W			

THALES

Puissance de sortie des klystrons (continu ou impulsions)



fréquence (MHz)



La puissance de sortie P_S du klystron est reliée à la puissance du faisceau $P = V_0I_0$ par la relation $P_S = \eta V_0I_0$, η étant le rendement d'interaction, V_0 la tension d'accélération des électrons et I_0 le courant du faisceau.

Pour augmenter la puissance de sortie , il faut augmenter la puissance du faisceau ou le rendement . Le rendement d'interaction étant limité , l'augmentation de la puissance de sortie passe par une augmentation de la puissance du faisceau , c'est à dire de I_0 et V_0 .

Mais I_0 et V_0 ne sont pas des paramètres indépendants : ils sont liés à la charge d'espace du faisceau.



 I_0 et V_0 sont liés par la loi de Child – Langmuir, ce qui est une conséquence de la limitation du courant émis par la charge d'espace dans le canon du klystron

$$\begin{array}{lll} \text{équation de Poisson} & \Delta V + \frac{\rho}{\epsilon_{0}} = 0 \\ \text{densité de courant} & J = \rho \, u_{0} = \rho \, \sqrt{2 \, \eta \, V} \\ \text{d'où} & J = - \epsilon_{0} \, \sqrt{2 \, \eta \, V} \, \Delta V \end{array}$$

Si (V_0, J_0) est une solution, alors $(mV_0, m^{3/2}J_0)$ est aussi solution. Donc $\frac{J_0}{V_0^{-3/2}}$ est une constante dépendant de la géométrie du canon diode.

La pervéance est la constante définie par $P = \frac{I_0}{V_0^{3/2}}$

THALES

Le faisceau accéléré et mis en forme dans le canon est injecté dans l'espace de glissement . La charge d'espace dans le faisceau se traduit par un creux de potentiel ΔV dans le faisceau donnée par :

$$\Delta V = \int_{o}^{a} E \, dr = \int_{o}^{b} \frac{r\rho}{2\epsilon o} dr + \int_{b}^{a} \frac{b^{2}\rho}{2r\epsilon o} dr = \frac{b^{2}\rho}{4\epsilon o} \left[1 + 2\ln\left(\frac{a}{b}\right)\right]$$

b étant le rayon du faisceau et a le rayon du tube de glissement

or
$$I_0 = \pi b^2 J = \pi b^2 \rho u_0$$
 \rightarrow $b^2 \rho = \frac{I}{\pi \sqrt{2\eta V o}}$

$$E(r)$$

0 b a

Pour un rapport b/a = 0.6 on a :
$$\frac{\Delta V}{V_o}$$
 = 3,065 10 ⁴ $\frac{I_o}{V_o^{3/2}}$

et $\frac{\Delta V}{Vo} = \frac{1}{4\pi\epsilon o_2/2n} \frac{I_0}{V_0^{3/2}} \left[1 + 2\ln\left(\frac{a}{b}\right)\right]$

Pour que le creux de potentiel reste inférieur à 5%, il faut limiter la pervéance du faisceau à 1.6 10⁻⁶

$$\frac{I_{\rm O}}{V_{\rm O}^{3/2}} \le 1,6\ 10^{-6}$$



La charge d'espace intervient dans le calcul des glissements entre les cavités du klystron .En effet la distance ℓ entre 2 cavités successives est à peu près un quart de longueur d'onde de plasma

$$\theta_{q} = \beta_{q} \ell = \frac{\omega_{q} \ell}{u_{O}} = \left(\frac{\omega_{q}}{\omega_{p}}\right) \left(\frac{\omega_{p}}{\omega}\right) \left(\frac{\omega \ell}{u_{O}}\right) \approx \frac{\pi}{2}$$

 $R = \frac{\omega_q}{\omega_p}$ facteur de réduction de la fréquence de plasma

Comme
$$\frac{\omega \ell}{u_o} = \frac{2\pi C}{u_o} \frac{\ell}{\lambda} = \frac{2\pi C}{\sqrt{2\eta V_o}} \frac{\ell}{\lambda} \rightarrow \theta_q = 5,56 \ 10^5 \left(\frac{R}{\gamma b}\right) \left(\frac{\ell}{\lambda}\right) \left(\frac{I_o}{V_o^{5/2}}\right)$$

et finalement :
$$\frac{I_0}{V_0^{5/2}} = \left(\frac{\gamma b}{R}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{\ell}\right)^2 \theta_q^2 \cdot 3,09 \quad 10^{-11}$$

La puissance du faisceau est donc proportionnelle à $V^{7/2}$ (P. Palluel, 1980)

Relation entre puissance de sortie des klystrons et tension cathode



La puissance de sortie du klystron augmente avec la tension, mais l'augmentation de la tension est limitée par les claquages dans le canon, c'est à dire les arcs sous vide. Ces arcs sont précédés par des courants de fuite, pour lesquels l'émission électronique dépend souvent du champ en suivant une loi de Fowler Nordheim :

$$j_{fe} = \frac{A \cdot E^2}{t(y)^2 \cdot \phi} \exp\left(\frac{-B}{E} \cdot v(y) \cdot \phi^{\frac{3}{2}}\right)$$

Le claquage est obtenu lorsque l'on augmente la tension jusqu'à atteindre le champ (microscopique) de claquage , compris entre 5 10^3 et 10^4 kV/mm . Dans ces conditions la tension de claquage varie proportionnellement à la distance d entre électrodes . C'est ce que l'on observe pour les faibles distances .

Mais lorsque cette distance d devient grande la tension ne varie plus proportionnellement à d, mais à la racine carrée de d. Pour expliquer cette situation, on utilise des modèles prenant en compte des particules chargées et accélérées par la tension entre électrodes. Dans ce cas la limite de claquage est donnée par le produit de la tension par le champ électrique maximal : Emax. V.

Outre l'état de surface des électrodes le claquage dépend fortement du vide dans l'espace entre les électrodes .



Tension de claquage entre 2 électrodes (distance 1 cm) en fonction de la pression





Il existe beaucoup de configurations pouvant conduire à un claquage. La présence de pointes à la surface de l'électrode se traduit par une forte augmentation du champ électrique, et l'extrémité de la pointe devient un site d'émission de courant par effet de champ.





D'autres sites d'émission de courant montrent la présence de matériaux diélectriques à la surface du métal (Métal Isolant Vide) ou de particules métalliques sur une couche diélectrique (Métal Isolant Métal). Pour ces configurations le courant émis par effet de champ est supérieur à celui émis par des pointes métalliques.







Tension de claquage en fonction de la distance entre les électrodes





Canon de klystron avec le tracé des équipotentielles .





25 Microwave & Imaging Sub-Systems - RFM-Vélizy

L'examen des champs et tensions de claquage dans les canons des klystrons de puissance montre que la limite de claquage est liée à la valeur du produit E_{max} .V. Le claquage dans les canons de klystrons est donc lié à la présence de particules dans le canon, ce qui est cohérent avec les distances entre les électrodes (autour de 1 cm). C'est pour cette raison que l'assemblage des tubes doit être effectué dans une salle propre.

L'expérience montre que les tensions continues que l'on peut appliquer à la cathode sont limitées à des valeurs voisines de 100 kV .On peut appliquer des tensions plus élevées en régime d'impulsion (jusqu'à 600 kV), en réduisant la largeur d'impulsion lorsque la tension augmente.

La décroissance de la largeur d'impulsion est plus rapide que l'augmentation de la puissance crête, c'est à dire que lorsque la puissance crête augmente l'énergie par impulsion diminue.



Limite du produit Emax.V en fonction de la largeur de l'impulsion .





Diagramme puissance crête énergie par impulsion pour les klystrons





Application du théorème de Poynting au circuit de sortie du klystron (cavité simple ou résonateur à plusieurs cellules pour un klystron à interaction étendue)

$$\begin{split} & \iiint_{V} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} DE + \frac{1}{2} BH \right) dv + \iiint_{V} (E.J) dv + \iint_{S} (E \wedge H) ds = 0 \\ & J = J \text{ conduction } + J \text{ convection} \\ & V = \text{ Volume du circuit de sortie} \\ & - \iiint_{V} E.J_{\text{conv.}} dv = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V} \frac{1}{2} (DE + BH) dv + \iiint_{V} E.J_{\text{cond}} dv + \iint_{S} E \wedge H ds \\ & - \iiint_{V} E.J_{\text{conv.}} dv = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V} \frac{1}{2} (DE + BH) dv + \iiint_{V} E.J_{\text{cond}} dv + \iint_{S} E \wedge H ds \\ & \text{Puissance générée} \\ & \text{Pariation de} \\ & \text{Pertes} \\ & \text{résistives } P_{7} \\ & \text{Puissance} \\ & \text{delivrée à la charge } P_{1} \\ \end{split}$$

THALES

Expression de la puissance générée par l'interaction avec le faisceau

$$\iiint_{V} E . J dv = \iiint_{V} E \left(\frac{J}{J_{O}}\right) . J_{O} dv \leq \left|E_{\max}\right| \cdot \left|\frac{J}{J_{O}}\right|^{\max} . \iiint_{V} J_{O} dv$$

 $J_0 = \rho_0 u_0$ densité de courant dans le faisceau non modulé

$$\iiint_V J_O dv = u_O \iiint_V \rho_O dv = q u_O = I_O.L$$

avec q : charge contenue dans le volume V du faisceau correspondant à une longueur L , ce qui donne au final :

х

$$P_L + P_l \leq \left(\frac{J}{J_0}\right)_{\max}$$

Puissance cédée à la charge et pertes dans le circuit de sortie

efficacité de la mise en paquets

$$I_{O}$$
 x (E_{max}) .

Courant faisceau tension maximale sur l'axe du circuit de sortie

L)



On peut exprimer le rendement d'interaction de la façon suivante :

$$\eta_{e} = \frac{P_{L}}{V_{0}I_{0}} = \frac{-\iiint_{V}EJdV}{(1+\frac{P_{loss}}{P_{L}})V_{0}I_{0}} \leq \frac{1}{(1+\frac{P_{loss}}{P_{L}})}\left(\frac{J}{J_{0}}\right)_{max} \frac{(E_{max}L)}{V_{0}}$$

Les principaux facteurs qui contribuent au rendement d'interaction sont :

- la phase entre E et J (idéalement 180°)
- les pertes par effet de peau dans les parois de la cavité
- l'efficacité du groupement des électrons en paquets (fortement dépendant de la charge d'espace)
- le champ électrique maximal pour éviter les claquages RF et les électrons qui rebroussent chemin
- la longueur du circuit de sortie (limitée par les risques d'oscillation)

Une autre voie d'amélioration possible est d'augmenter le rendement global par l'utilisation de collecteurs déprimés.

THALES

On peut utiliser les différents facteurs de qualité caractérisant le circuit de sortie du klystron :

$$P_{\text{loss}} = \omega \frac{Ws}{Qo} \qquad P_L = \omega \frac{Ws}{Qext} \qquad P_L + P_{\text{loss}} = \omega Ws \left(\frac{1}{Qo} + \frac{1}{Qext}\right) = \frac{\omega Ws}{Q_L}$$
$$P_L = \left(1 - \frac{Q_L}{Q_O}\right) \left(-\iiint_V E.J \, dv\right)$$

Lorsque la fréquence augmente, les pertes par effet de peau augmentent comme la racine carrée de la fréquence, le coefficient de surtension Q0 décroît comme l'inverse de la racine carrée de la fréquence, et la puissance cédée à la charge décroît. Pour contrer cette tendance on utilise des cavités avec volume plus grand lorsque l'on monte en fréquence :

- des résonateurs couplés , ce qui augmente la longueur de la structure , pour les klystrons à interaction étendue
- des cavités surdimensionnées (en longueur et en diamètre) pour les gyroklystrons



La pervéance du faisceau a une forte influence sur la charge d'espace , donc sur le groupement des électrons en paquets et in fine sur le rendement .



Après interaction les électrons du faisceau viennent bombarder les parois du collecteur . La séparation des fonctions dans un klystron permet de choisir les dimensions de celui ci de façon à garder des valeurs de densité de puissance acceptables sur les parois du collecteur . Il en résulte que la puissance moyenne des tubes ne dépend pas de la fréquence . A l'heure actuelle cette limite se situe autour de 1 MW .

La plupart des collecteurs de klystrons sont refroidis par évaporation de liquide : procédés vapotron et hypervapotron . La densité de puissance n'est pas uniforme sur les parois, mais reste inférieure à 1 kW/cm² (d'ordinaire entre 300 et 800W/cm²).

La convection forcée de liquide permet d'atteindre des densités de puissance supérieures au travers de la paroi du collecteur si le flux est turbulent . Mais ceci requiert un débit élevé , et les pertes de charge augmentent comme le débit à la puissance 1.8 . C'est pourquoi cette technique est rarement utilisée pour les gros tubes

L'utilisation d'un échangeur de chaleur en métal poreux permet de créer un flux turbulent sans augmenter le débit de façon excessive . Cette technique est utilisée pour le refroidissement de la cavité des gyrotrons et du TH 2103C avec des densités de puissance voisines de 1 kW/cm^2 .



6 _ limites en puissance moyenne

4 exemples de tubes délivrant 1 MW CW entre 200 MHz et 140 GHz

Tube reference	TH 628	TH 2089	TH 2103 C	TH 1507
Tube type	Diacrode	Klystron	Klystron	Gyrotron
Frequency	200 MHz	352 MHz	3.7 GHz	140 GHz
Output power	1 MW	1.05 MW	0.75 MW	0.90 MW
Beam voltage	16 kV	86 kV	76 kV	82 kV
Beam current	96 A	18 A	22 A	40 A
Interaction efficiency	65 %	68 %	45 %	26 % (global 41 %)
Maximum Power dissipated in collector	0.53 MW	1.55 MW	1.67 MW	1.6 MW
Collector Cooling	Forced water convection	Hypervapotron	Hypervapotron	Hypervapotron
Cooling water flow	9001/minute	14501/minute	1570 l / minute	13001/minute
Overall length	2.69 m	4.88 m	2.21 m	2.57 m
Tube weight	1000 kg	1650 kg	400 kg	850 kg
Magnetic field	0	0.03 T	0.3 T	5.6 T
Electromagnet weight	0	650 kg	400 kg	1000 kg
Gain	14.9 dB	41 dB	50 dB	(oscillator)

35 Microwave & Imaging Sub-Systems - RFM-Vélizy



6 _ limites en puissance moyenne


6 _ limites en puissance moyenne

A la différence du collecteur les dimensions de la structure RF sont fixées par la fréquence et la tension . Si le tube délivre une très forte puissance moyenne , il faut une excellente transmission du faisceau pour éviter de fondre les glissements et les becs des cavités . Ceci est obtenu en prenant un champ magnétique très supérieur au champ de Brillouin dont la valeur croît avec la fréquence .



Ainsi donc, si la puissance moyenne ne dépend pas de la fréquence, le prix à payer (le champ magnétique de focalisation) croît proportionnellement à la fréquence.



Les développements récents des tubes pour applications scientifiques ont porté sur :

une augmentation de la puissance crête

→ TH 2153

une augmentation de la largeur d'impulsions

→ TH 2151, TH 2168 et TH 2179

une augmentation de la puissance moyenne

→ TH 2103C

- **une augmentation du rendement**
 - → TH 1801 et TH 1802
- une augmentation de la fréquence
 - → famille des gyrotrons)

L'objectif de la plupart de ces développements était une augmentation de l'énergie, et non une augmentation de la puissance crête

TH 2153 klystron de forte puissance crête

tension cathode	V = 600 kV		
courant cathode	$\mathbf{I} = 600 \; \mathbf{A}$		
puissance crête	P = 150 MW		
largeur d'impulsion $T = 1 \mu s$			
fréquence	F = 3 GHz		
longueur	: 2.4 m		
diamètre solénoïde : 0.65 m			





TH 1802
klystron en
impulsions longues

Klystron multifais	ceaux (7)
tension cathode	V = 120 kV
courant cathode	$\mathbf{I} = 140 \ \mathbf{A}$
puissance crête	$\mathbf{P} = 10 \ \mathbf{MW}$
largeur d'impulsio	on $T = 1,5 ms$
fréquence	F = 1,3 GHz
longueur	: 2.5 m
diamètre solénoïd	le : 0.6 m



THALES

TH 2103 C klystron continu

fréquence	MHz	3700	
puissance de sortie	1 <i>-</i> W/	700	ROS < 1.05
minimale	KW	620	ROS = 1.4:1
durée d'impulsion	S	1000	taux de travail =1/6
rendement minimal	%	44	ROS < 1.05
		38	ROS = 1.4:1
puissance d'entrée	W	6.7	
gain minimal	dB	50	
tension cathode	kV	76	
courant faisceau	Α	22	
pervéance	μA/V1.5	1.05	
bande à -1dB	MHz	5	
puissance dissipée sur le collecteur	kW	1670	puissance du faisceau sans pilotage RF





TH2179 pour LINAC4 CERN





140±0.5GHz 1MW/30min diode type MIG Cylindrique TE 28,8 ≈ 5,6 Tesla **TEM00** un étage déprimé diamant CVD $\approx 80 \text{ kV}$ **40A** ≈ - 28 kV / cavité 45%

THALES



Performances des klystrons : état de l'art et limites

A.J. Durand et R. Marchesin

LAL, Orsay, le 27 octobre 2011



Microwave & Imaging Sub-Systems - RFM-Vélizy -

Contenu de la présentation

- 1. présentation du klystron
- 2. exemples de klystrons pour applications scientifiques
- 3. les effets de la charge d'espace :
- 4. limites de puissance crête et d'énergie par impulsion
- 5. Limitations du rendement d'interaction
- 6. limites en puissance moyenne
- 7. Conclusions : axes de développement



La structure du klystron se décompose en trois parties dont les fonctions sont différentes :

- Le <u>canon</u> où les électrons sont émis par la cathode , accélérés par la différence de potentiel entre la cathode et l'anode et où le faisceau est mis en forme par la géométrie des électrodes et le champ magnétique.
- L'espace d'interaction où le faisceau est maintenu dans la forme adéquate (en général cylindrique) par un champ magnétique afin d'optimiser l'interaction avec l'onde stationnaire des cavités .
- Le <u>collecteur</u> qui recueille le faisceau d'électrons après interaction et convertit l'énergie résiduelle des électrons en chaleur qu'il faut évacuer par un système de refroidissement approprié .

Cette séparation des fonctions donne plus de liberté pour optimiser chaque partie . C'est pourquoi le klystron constitue le meilleur choix pour les accélérateurs de particules : il a un rendement élevé (jusqu'à 65 %), fournit de fortes puissances crête (jusqu'à 100 MW) et moyenne (jusqu'à 1,3 MW), avec un grand gain (40 à 60 dB), et sa faible bande passante n'est pas gênante pour des applications à fréquence fixe.



• Description d'un klystron de puissance

le collecteur

La structure d'interaction composée de cavités résonantes et du solénoïde pour la focalisation magnétique

> Le canon à électrons : émission , mise en forme et accélération du faisceau



Le champ électrique micro-onde entre les becs de la cavité d'entrée accélère les électrons pendant une alternance et les ralentit pendant l'alternance suivante. Il réalise une modulation de vitesse du faisceau.



Les électrons accélérés rattrapent les électrons ralentis pendant l'alternance précédente : il se produit un groupement en paquet (modulation de densité).

THALES

Calcul d'un klystron 6 MW bande S: trajectoires électroniques calculées à l'aide d'un code d'interaction 2D



6

Les courbes représentent la croissance du courant de modulation (harmoniques 1 à 4) en fonction de la distance (longueur des glissements en mm).



modulation de vitesse des électrons en fonction de la distance.



La taille des cavités et la longueur des tubes de glissement entre les cavités sont proportionnelles à la longueur d'onde. Les dimensions de la structure d'interaction augmentent lorsque la fréquence décroît.



La longueur des tubes de glissement entre les cavités est proportionnelle à la vitesse des électrons. La longueur de la structure d'interaction augmente lorsque la tension augmente.



klystron en impulsions courtes pour accélérateurs de particules



TH 2132		
puissance crête	:	45 MW
largeur d'impulsion	:	5 µs
puissance moyenne	:	20 kW
tension Cathode	:	308 kV

courant cathode: 337 Arendement: 44%

puissance d'entrée : 160 W

TH 2100

puissance crête	•	35 MW
largeur d'impulsion	:	4,5 µs
puissance moyenne	:	17,5 kW
tension Cathode	:	276 kV
courant cathode	:	285 A
rendement	:	45%
puissance d'entrée	:	180 W



TH 2104 : klystron bande L (1,3 GHz) en impulsions longues

On peut augmenter la largeur d'impulsion en réduisant la puissance crête

tension cathode	courant faisceau	puissance crête	durée d'impulsion	puissance moyenne
kV	Α	MW	μs	kW
200	179	15	100	50
165	135	10	250	250
130	94	5	600	150



TH 2103			
klystrons en continu	puissance	: 0,5 MW	
	Fréquence	:3,7 GHz	
	tension Cathode	: 60 kV	
	courant cathode	: 19,5 A	
TH 2089	rendement puissance d'entrée	: 43 % e : 6 W	
puissance : 1,3 MW	1		
Fréquence : 352 MHz			
tension Cathode : 100 kV			
courant cathode : 20 A			
rendement : 63 %			
puissance d'entrée : 75 W			

THALES

Puissance de sortie des klystrons (continu ou impulsions)



fréquence (MHz)



La puissance de sortie P_S du klystron est reliée à la puissance du faisceau $P = V_0I_0$ par la relation $P_S = \eta V_0I_0$, η étant le rendement d'interaction, V_0 la tension d'accélération des électrons et I_0 le courant du faisceau.

Pour augmenter la puissance de sortie , il faut augmenter la puissance du faisceau ou le rendement . Le rendement d'interaction étant limité , l'augmentation de la puissance de sortie passe par une augmentation de la puissance du faisceau , c'est à dire de I_0 et V_0 .

Mais I_0 et V_0 ne sont pas des paramètres indépendants : ils sont liés à la charge d'espace du faisceau.



 I_0 et V_0 sont liés par la loi de Child – Langmuir, ce qui est une conséquence de la limitation du courant émis par la charge d'espace dans le canon du klystron

$$\begin{array}{ll} \text{équation de Poisson} & \Delta V + \frac{\rho}{\epsilon_0} = 0 \\ \text{densité de courant} & J = \rho \, u_0 = \rho \, \sqrt{2 \, \eta \, V} \\ \text{d'où} & J = - \epsilon_0 \, \sqrt{2 \, \eta \, V} \, \Delta V \end{array}$$

Si (V_0, J_0) est une solution, alors $(mV_0, m^{3/2}J_0)$ est aussi solution. Donc $\frac{J_0}{V_0^{-3/2}}$ est une constante dépendant de la géométrie du canon diode.

La pervéance est la constante définie par $P = \frac{I_0}{V_0^{3/2}}$

THALES

Le faisceau accéléré et mis en forme dans le canon est injecté dans l'espace de glissement . La charge d'espace dans le faisceau se traduit par un creux de potentiel ΔV dans le faisceau donnée par :

$$\Delta V = \int_{o}^{a} E \, dr = \int_{o}^{b} \frac{r\rho}{2\epsilon o} dr + \int_{b}^{a} \frac{b^{2}\rho}{2r\epsilon o} dr = \frac{b^{2}\rho}{4\epsilon o} \left[1 + 2\ln\left(\frac{a}{b}\right)\right]$$

b étant le rayon du faisceau et a le rayon du tube de glissement

or
$$I_0 = \pi b^2 J = \pi b^2 \rho u_0$$
 \rightarrow $b^2 \rho = \frac{I}{\pi \sqrt{2\eta V o}}$

$$E(r)$$

0 b a

Pour un rapport b/a = 0.6 on a :
$$\frac{\Delta V}{V_o}$$
 = 3,065 10 ⁴ $\frac{I_o}{V_o^{3/2}}$

et $\frac{\Delta V}{Vo} = \frac{1}{4\pi\epsilon o_2/2n} \frac{I_0}{V_0^{3/2}} \left[1 + 2\ln\left(\frac{a}{b}\right)\right]$

Pour que le creux de potentiel reste inférieur à 5%, il faut limiter la pervéance du faisceau à 1.6 10⁻⁶

$$\frac{I_{\rm O}}{V_{\rm O}^{3/2}} \le 1,6\ 10^{-6}$$



La charge d'espace intervient dans le calcul des glissements entre les cavités du klystron .En effet la distance ℓ entre 2 cavités successives est à peu près un quart de longueur d'onde de plasma

$$\theta_{q} = \beta_{q} \ell = \frac{\omega_{q} \ell}{u_{O}} = \left(\frac{\omega_{q}}{\omega_{p}}\right) \left(\frac{\omega_{p}}{\omega}\right) \left(\frac{\omega \ell}{u_{O}}\right) \approx \frac{\pi}{2}$$

 $R = \frac{\omega_q}{\omega_p}$ facteur de réduction de la fréquence de plasma

Comme
$$\frac{\omega \ell}{u_o} = \frac{2\pi C}{u_o} \frac{\ell}{\lambda} = \frac{2\pi C}{\sqrt{2\eta V_o}} \frac{\ell}{\lambda} \rightarrow \theta_q = 5,56 \ 10^5 \left(\frac{R}{\gamma b}\right) \left(\frac{\ell}{\lambda}\right) \left(\frac{I_o}{V_o^{5/2}}\right)$$

et finalement :
$$\frac{I_0}{V_0^{5/2}} = \left(\frac{\gamma b}{R}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{\ell}\right)^2 \theta_q^2 \cdot 3,09 \quad 10^{-11}$$

La puissance du faisceau est donc proportionnelle à $V^{7/2}$ (P. Palluel, 1980)

Microwave & Imaging Sub-Systems - RFM-Vélizy

18

THALES

Relation entre puissance de sortie des klystrons et tension cathode



La puissance de sortie du klystron augmente avec la tension, mais l'augmentation de la tension est limitée par les claquages dans le canon, c'est à dire les arcs sous vide. Ces arcs sont précédés par des courants de fuite, pour lesquels l'émission électronique dépend souvent du champ en suivant une loi de Fowler Nordheim :

$$j_{fe} = \frac{A \cdot E^2}{t(y)^2 \cdot \phi} \exp\left(\frac{-B}{E} \cdot v(y) \cdot \phi^{\frac{3}{2}}\right)$$

Le claquage est obtenu lorsque l'on augmente la tension jusqu'à atteindre le champ (microscopique) de claquage , compris entre 5 10^3 et 10^4 kV/mm . Dans ces conditions la tension de claquage varie proportionnellement à la distance d entre électrodes . C'est ce que l'on observe pour les faibles distances .

Mais lorsque cette distance d devient grande la tension ne varie plus proportionnellement à d, mais à la racine carrée de d. Pour expliquer cette situation, on utilise des modèles prenant en compte des particules chargées et accélérées par la tension entre électrodes. Dans ce cas la limite de claquage est donnée par le produit de la tension par le champ électrique maximal : Emax. V.

Outre l'état de surface des électrodes le claquage dépend fortement du vide dans l'espace entre les électrodes .



Tension de claquage entre 2 électrodes (distance 1 cm) en fonction de la pression





Il existe beaucoup de configurations pouvant conduire à un claquage. La présence de pointes à la surface de l'électrode se traduit par une forte augmentation du champ électrique, et l'extrémité de la pointe devient un site d'émission de courant par effet de champ.





D'autres sites d'émission de courant montrent la présence de matériaux diélectriques à la surface du métal (Métal Isolant Vide) ou de particules métalliques sur une couche diélectrique (Métal Isolant Métal). Pour ces configurations le courant émis par effet de champ est supérieur à celui émis par des pointes métalliques.







Tension de claquage en fonction de la distance entre les électrodes





Canon de klystron avec le tracé des équipotentielles .





25 Microwave & Imaging Sub-Systems - RFM-Vélizy

L'examen des champs et tensions de claquage dans les canons des klystrons de puissance montre que la limite de claquage est liée à la valeur du produit E_{max} .V. Le claquage dans les canons de klystrons est donc lié à la présence de particules dans le canon, ce qui est cohérent avec les distances entre les électrodes (autour de 1 cm). C'est pour cette raison que l'assemblage des tubes doit être effectué dans une salle propre.

L'expérience montre que les tensions continues que l'on peut appliquer à la cathode sont limitées à des valeurs voisines de 100 kV .On peut appliquer des tensions plus élevées en régime d'impulsion (jusqu'à 600 kV), en réduisant la largeur d'impulsion lorsque la tension augmente.

La décroissance de la largeur d'impulsion est plus rapide que l'augmentation de la puissance crête, c'est à dire que lorsque la puissance crête augmente l'énergie par impulsion diminue.



Limite du produit Emax.V en fonction de la largeur de l'impulsion .





Diagramme puissance crête énergie par impulsion pour les klystrons





5 _ limitations du rendement d'interaction

Application du théorème de Poynting au circuit de sortie du klystron (cavité simple ou résonateur à plusieurs cellules pour un klystron à interaction étendue)

$$\begin{split} & \iiint_{V} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} DE + \frac{1}{2} BH \right) dv + \iiint_{V} (E.J) dv + \iint_{S} (E \wedge H) ds = 0 \\ & J = J \text{ conduction } + J \text{ convection} \\ & V = \text{ Volume du circuit de sortie} \\ & - \iiint_{V} E.J_{\text{conv.}} dv = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V} \frac{1}{2} (DE + BH) dv + \iiint_{V} E.J_{\text{cond}} dv + \iint_{S} E \wedge H ds \\ & - \iiint_{V} E.J_{\text{conv.}} dv = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V} \frac{1}{2} (DE + BH) dv + \iiint_{V} E.J_{\text{cond}} dv + \iint_{S} E \wedge H ds \\ & \text{Puissance générée} \\ & \text{Pariation de} \\ & \text{Pertes} \\ & \text{résistives } P_{7} \\ & \text{Puissance} \\ & \text{delivrée à la charge } P_{1} \\ \end{split}$$

THALES
Expression de la puissance générée par l'interaction avec le faisceau

$$\iiint_{V} E . J dv = \iiint_{V} E \left(\frac{J}{J_{O}}\right) . J_{O} dv \leq \left|E_{\max}\right| \cdot \left|\frac{J}{J_{O}}\right|^{\max} . \iiint_{V} J_{O} dv$$

 $J_0 = \rho_0 u_0$ densité de courant dans le faisceau non modulé

$$\iiint_V J_O dv = u_O \iiint_V \rho_O dv = q u_O = I_O.L$$

avec q : charge contenue dans le volume V du faisceau correspondant à une longueur L , ce qui donne au final :

х

$$P_L + P_l \leq \left(\frac{J}{J_0}\right)_{\max}$$

Puissance cédée à la charge et pertes dans le circuit de sortie

efficacité de la mise en paquets

$$I_{O}$$
 x (E_{max}) .

Courant faisceau tension maximale sur l'axe du circuit de sortie

L)



On peut exprimer le rendement d'interaction de la façon suivante :

$$\eta_{e} = \frac{P_{L}}{V_{0}I_{0}} = \frac{-\iiint_{V}EJdV}{(1+\frac{P_{loss}}{P_{L}})V_{0}I_{0}} \leq \frac{1}{(1+\frac{P_{loss}}{P_{L}})}\left(\frac{J}{J_{0}}\right)_{max} \frac{(E_{max}L)}{V_{0}}$$

Les principaux facteurs qui contribuent au rendement d'interaction sont :

- la phase entre E et J (idéalement 180°)
- les pertes par effet de peau dans les parois de la cavité
- l'efficacité du groupement des électrons en paquets (fortement dépendant de la charge d'espace)
- le champ électrique maximal pour éviter les claquages RF et les électrons qui rebroussent chemin
- la longueur du circuit de sortie (limitée par les risques d'oscillation)

Une autre voie d'amélioration possible est d'augmenter le rendement global par l'utilisation de collecteurs déprimés.

THALES

On peut utiliser les différents facteurs de qualité caractérisant le circuit de sortie du klystron :

$$P_{\text{loss}} = \omega \frac{Ws}{Qo} \qquad P_L = \omega \frac{Ws}{Qext} \qquad P_L + P_{\text{loss}} = \omega Ws \left(\frac{1}{Qo} + \frac{1}{Qext}\right) = \frac{\omega Ws}{Q_L}$$
$$P_L = \left(1 - \frac{Q_L}{Q_O}\right) \left(-\iiint_V E.J \, dv\right)$$

Lorsque la fréquence augmente, les pertes par effet de peau augmentent comme la racine carrée de la fréquence, le coefficient de surtension Q0 décroît comme l'inverse de la racine carrée de la fréquence, et la puissance cédée à la charge décroît. Pour contrer cette tendance on utilise des cavités avec volume plus grand lorsque l'on monte en fréquence :

- des résonateurs couplés , ce qui augmente la longueur de la structure , pour les klystrons à interaction étendue
- des cavités surdimensionnées (en longueur et en diamètre) pour les gyroklystrons



La pervéance du faisceau a une forte influence sur la charge d'espace , donc sur le groupement des électrons en paquets et in fine sur le rendement .



Après interaction les électrons du faisceau viennent bombarder les parois du collecteur . La séparation des fonctions dans un klystron permet de choisir les dimensions de celui ci de façon à garder des valeurs de densité de puissance acceptables sur les parois du collecteur . Il en résulte que la puissance moyenne des tubes ne dépend pas de la fréquence . A l'heure actuelle cette limite se situe autour de 1 MW .

La plupart des collecteurs de klystrons sont refroidis par évaporation de liquide : procédés vapotron et hypervapotron . La densité de puissance n'est pas uniforme sur les parois, mais reste inférieure à 1 kW/cm² (d'ordinaire entre 300 et 800W/cm²).

La convection forcée de liquide permet d'atteindre des densités de puissance supérieures au travers de la paroi du collecteur si le flux est turbulent . Mais ceci requiert un débit élevé , et les pertes de charge augmentent comme le débit à la puissance 1.8 . C'est pourquoi cette technique est rarement utilisée pour les gros tubes

L'utilisation d'un échangeur de chaleur en métal poreux permet de créer un flux turbulent sans augmenter le débit de façon excessive . Cette technique est utilisée pour le refroidissement de la cavité des gyrotrons et du TH 2103C avec des densités de puissance voisines de 1 kW/cm^2 .



6 _ limites en puissance moyenne

4 exemples de tubes délivrant 1 MW CW entre 200 MHz et 140 GHz

Tube reference	TH 628	TH 2089	TH 2103 C	TH 1507
Tube type	Diacrode	Klystron	Klystron	Gyrotron
Frequency	200 MHz	352 MHz	3.7 GHz	140 GHz
Output power	1 MW	1.05 MW	0.75 MW	0.90 MW
Beam voltage	16 kV	86 kV	76 kV	82 kV
Beam current	96 A	18 A	22 A	40 A
Interaction efficiency	65 %	68 %	45 %	26 % (global 41 %)
Maximum Power dissipated in collector	0.53 MW	1.55 MW	1.67 MW	1.6 MW
Collector Cooling	Forced water convection	Hypervapotron	Hypervapotron	Hypervapotron
Cooling water flow	9001/minute	14501/minute	1570 l / minute	13001/minute
Overall length	2.69 m	4.88 m	2.21 m	2.57 m
Tube weight	1000 kg	1650 kg	400 kg	850 kg
Magnetic field	0	0.03 T	0.3 T	5.6 T
Electromagnet weight	0	650 kg	400 kg	1000 kg
Gain	14.9 dB	41 dB	50 dB	(oscillator)

35 Microwave & Imaging Sub-Systems - RFM-Vélizy



6 _ limites en puissance moyenne



6 _ limites en puissance moyenne

A la différence du collecteur les dimensions de la structure RF sont fixées par la fréquence et la tension . Si le tube délivre une très forte puissance moyenne , il faut une excellente transmission du faisceau pour éviter de fondre les glissements et les becs des cavités . Ceci est obtenu en prenant un champ magnétique très supérieur au champ de Brillouin dont la valeur croît avec la fréquence .



Ainsi donc, si la puissance moyenne ne dépend pas de la fréquence, le prix à payer (le champ magnétique de focalisation) croît proportionnellement à la fréquence.



Les développements récents des tubes pour applications scientifiques ont porté sur :

une augmentation de la puissance crête

→ TH 2153

une augmentation de la largeur d'impulsions

→ TH 2151, TH 2168 et TH 2179

une augmentation de la puissance moyenne

→ TH 2103C

- **une augmentation du rendement**
 - → TH 1801 et TH 1802
- une augmentation de la fréquence
 - → famille des gyrotrons)

L'objectif de la plupart de ces développements était une augmentation de l'énergie, et non une augmentation de la puissance crête

TH 2153 klystron de forte puissance crête

tension cathode	V = 600 kV	
courant cathode	$\mathbf{I} = 600 \; \mathbf{A}$	
puissance crête	P = 150 MW	
largeur d'impulsion $T = 1 \mu s$		
fréquence	F = 3 GHz	
longueur	: 2.4 m	
diamètre solénoïde : 0.65 m		





TH 1802
klystron en
impulsions longues

Klystron multifaisceaux (7)				
tension cathode	V = 120 kV			
courant cathode	$\mathbf{I} = 140 \ \mathbf{A}$			
puissance crête	$\mathbf{P} = 10 \ \mathbf{MW}$			
largeur d'impulsion T = 1,5 ms				
fréquence	F = 1,3 GHz			
longueur	: 2.5 m			
diamètre solénoïde : 0.6 m				



THALES

TH 2103 C klystron continu

fréquence	MHz	3700	
puissance de sortie	1 <i>z</i> W/	700	ROS < 1.05
minimale	KW	620	ROS = 1.4:1
durée d'impulsion	s	1000	taux de travail =1/6
non dom ont minimal	0/	44	ROS < 1.05
	/0	38	ROS = 1.4:1
puissance d'entrée	W	6.7	
gain minimal	dB	50	
tension cathode	kV	76	
courant faisceau	A	22	
pervéance	μA/V1.5	1.05	
bande à -1dB	MHz	5	
puissance dissipée sur le collecteur	kW	1670	puissance du faisceau sans pilotage RF





TH2179 pour LINAC4 CERN





puissance canon mode de cavité **B** cavité sortie HF collecteur fenêtre tension faisceau courant faisceau tension collecteur rendement

140±0.5GHz 1MW/30min diode type MIG Cylindrique TE 28,8 ≈ 5,6 Tesla **TEM00** un étage déprimé diamant CVD $\approx 80 \text{ kV}$ **40A** ≈ - 28 kV / cavité 45%

