

CEA  
U  
R  
A  
T  
O  
M

ASSOCIATION EURATOM-C.E.A.

92 Fontenay-aux-Roses. (France)

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE DU PLASMA  
ET DE LA FUSION CONTROLLEE

ILWF  
IMS  
NSA

DPh-PFC/SPP

EUR-CEA-FC-652

Notice 1812

PROPRIETES DE FONCTIONNEMENT D'UNE SOURCE  
DE PLASMA A MICROONDES DE TYPE HELICOIDAL  
POUR UN REGIME DE DENSITE ET  
DE CHAMP MAGNETIQUE ELEVES

R. CANO, G. LISITANO\*, B. ZANFAGNA

Juillet 1972

\*Institut Für Plasmaphysik, Garching b. München, D.B.R.

*OPERATING PROPERTIES OF A HELICAL MICROWAVE PLASMA SOURCE  
IN A HIGH DENSITY HIGH MAGNETIC FIELD REGIME*

*Abstract.-*

The main features of a helical microwave plasma source are presented. The microwave power (1,5 kW at 2,45 GHz) is kept constant. The vacuum system has a basic pressure of  $10^{-6}$  Torr; Hydrogen and Argon are used and gas pressure is varied from  $10^{-4}$  to  $10^{-2}$  Torr. The magnetic field intensity is varied in the range  $1 \leq \frac{F_{ce}}{F} \leq 30$ . Plasma densities of  $n = 10^{11} - 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  and electron temperatures of  $T_e = 1-15 \text{ eV}$  are obtained. The degree of ionization has been estimated to vary between 1 % and 30 %.

Résumé -

On présente les principales caractéristiques d'une source de plasma à microondes de type hélicoïdal. La puissance microondes (1,5 kW à 2,45 KGz) est maintenue constante. Le vide de base de l'enceinte est de  $10^{-6}$  Torr. L'Hydrogène et l'Argon ont été utilisés dans un domaine de pression allant de  $10^{-4}$  à  $10^{-2}$  Torr. On a fait varier le champ magnétique dans la région  $1 \leq \frac{V_{ce}}{F} \leq 30$ . Les valeurs de la densité électronique sont comprises entre  $10^{11}$  et  $10^{13}$   $\text{cm}^{-3}$ , la température électronique variant de 1 à 15 eV. On a estimé que le degré d'ionisation variait entre 1 % et 30 %.

## I.- I N T R O D U C T I O N .

Les sources de plasma obtenues par une décharge microonde dans des structures appropriées en présence d'un champ magnétique statique ont fait l'objet de nombreuses études [ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ].

Dans la structure interdigitale la décharge est entretenue seulement dans la condition de résonance, c'est-à-dire, quand la fréquence microonde  $F$  est égale à la fréquence cyclotronique des électrons  $F_{ce}$ . Dans le cas de la structure à hélice, on a montré [ 9 ] les conditions d'existence de la décharge pour  $1 \leq \frac{F_{ce}}{F} \leq 3$ .

Dans ce rapport on présente une étude systématique des conditions de fonctionnement d'une source à hélice pour un champ magnétique variant dans la région  $1 \leq \frac{F_{ce}}{F} \leq 30$  et pour des valeurs de la densité électronique comprises entre  $10^{11}$  et  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ . L'Hydrogène et l'Argon ont été utilisés avec des résultats comparables.

## II.- D I S P O S I T I F E X P E R I M E N T A L .

La fig.1 montre l'appareillage utilisé. La source de plasma est située dans un maximum du champ magnétique caractérisé par une configuration à miroir (rapport de miroir = 2,17). Un magnétron de puissance 1,5 kW et de fréquence 2,45 GHz alimente la source par l'intermédiaire d'un guide d'onde.

Le gaz (Argon ou Hydrogène) est introduit dans le guide d'onde, et il est évacué au moyen d'une pompe à diffusion située à l'autre extrémité de la chambre à vide. Le vide primaire est réalisé par une pompe mécanique suivie d'une pompe "roots". L'ensemble de l'installation de pompage assure un vide de base de l'ordre de  $10^{-6}$  Torr. La source de plasma est représentée en détail à la fig.2. Elle est constituée essentiellement d'un cylindre de cuivre de diamètre égal à 5 cm, sur lequel on a pratiqué une fente hélicoïdale. Un cylindre en céramique et un autre en cuivre enveloppent l'hélice dans une géométrie concentrique. Une transition appropriée assure le couplage entre le guide d'onde et la source. En l'absence de plasma, la source représente une charge essentiellement réfléchissante, tandis qu'en présence de plasma 10 % de l'énergie seulement est réfléchi. Ce type de source présente les avantages suivants par rapport à d'autres systèmes de couplage d'une onde e.m. avec un plasma :

- 1) La puissance microonde est concentrée dans le volume de plasma entouré par l'hélice, ce qui évite des pertes par rayonnement dans la chambre à vide ; on peut donc s'attendre à des rendements très élevés.
- 2) Le champ électrique de l'onde incidente atteint sa valeur maximum près de la paroi intérieure de l'hélice et décroît vers l'axe. Cette propriété pourrait être à l'origine d'un effet de stabilisation de la décharge [10], en accord avec le faible niveau de fluctuations de densité observé ( $\frac{\Delta n}{n} < 10\%$ ).

3) La structure à hélice, comparée à la structure du type interdigital, qui n'est utilisable que pour  $\frac{Fce}{F} = 1$ , a un fonctionnement pratiquement indépendant du champ magnétique à la condition que  $\frac{Fce}{F} \gg 1$ .

### III.- R E S U L T A T S   E X P E R I M E N T A U X.

Les mesures ont été effectuées en maintenant fixes la puissance et la fréquence du magnétron. Pour une valeur déterminée de la pression du gaz, on a fait varier le champ magnétique de  $\frac{Fce}{F} = 1$  (condition d'amorçage) à la valeur maximum  $\frac{Fce}{F} = 30$  dont nous disposons. On a mesuré les profils radiaux de la densité à l'aide d'une sonde de Langmuir et d'un interféromètre en onde ordinaire à 32 GHz. Les profils de température électroniques ont été déduits des tracés de caractéristiques de la sonde. On peut évaluer à 10 % la précision des mesures des profils de densité et à 25 % celle des mesures des profils de température.

Les résultats pour l'Hydrogène sont montrés sur les fig.3 et 4 pour quatre valeurs de la pression.

Des résultats similaires ont été obtenus pour l'Argon pour trois valeurs de la pression (fig.5 et 6) avec une densité plus grande d'un ordre de grandeur. On peut remarquer dans le cas de l'Hydrogène que l'augmentation du champ magnétique provoque un pincement du profil de densité à pression élevée et un effet contraire à basse pression. Pour l'Argon on

ne remarque pas d'une manière évidente un effet de ce type de la part du champ magnétique.

Les fig. 7 et 8 montrent la variation de la densité et de la température maximum ainsi que leur valeur moyenne en fonction du champ magnétique. Sur ces figures est représentée aussi la densité moyenne d'énergie  $\bar{n}_e k\bar{T}_e$  ; on peut admettre qu'elle est pratiquement indépendante du champ magnétique compte tenu de la précision des mesures, alors qu'une valeur optimale peut être obtenue en faisant varier la pression du gaz. Il a été possible d'estimer le degré d'ionisation par la mesure de la densité électronique et par celle de la pression du gaz, étant donné que cette pression, qui est mesurée hors de la colonne de plasma, est la même qu'à l'intérieur. En effet, les sections efficaces de collisions inélastiques sont assez petites pour donner lieu à un libre parcours moyen plus grand que le diamètre du plasma, ce qui permet aux neutres de diffuser librement à travers le plasma. Le degré d'ionisation, ainsi calculé, varie entre 1 % et 10 % pour l'Hydrogène et entre 5 % et 30 % pour l'Argon. Ces valeurs sont limitées essentiellement par le gaz de recombinaison qui n'est pas totalement évacué par pompage et qui diffuse vers la section de mesure.

#### IV. - CONCLUSIONS.

Nous avons montré la possibilité pour une structure à hélice d'entretenir une décharge microonde pour des valeurs



de champ magnétique dans la région  $1 \leq \frac{Fce}{F} \leq 30$  avec des valeurs de la densité électronique comprises entre  $10^{11}$  et  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , la température électronique variant selon les conditions de 1 à 15 eV.

Les valeurs élevées de la densité électronique associées à des degrés d'ionisation assez forts montrent l'efficacité d'un tel type de source de plasma.

Les profils de densité indiquent que le diamètre du plasma est approximativement égal à celui de l'hélice ; on peut donc l'augmenter en augmentant celui de l'hélice.

La possibilité de fonctionnement pour des régimes de champ magnétique et de densité élevés avec une faible pression de remplissage, permet d'envisager l'utilisation de ce type de source pour la préionisation dans les dispositifs de confinement de plasma. En outre ces propriétés associées à un faible niveau de fluctuation de densité, ainsi qu'à une fonction de distribution essentiellement maxwellienne des électrons, rendent ce type de source particulièrement adapté pour les études de propagation d'ondes e.m. en régime non collisionnel.



## Légendes des Figures

- Figure 1 (a) Dispositif expérimental. La sonde de Langmuir et l'interféromètre microonde sont montés sur la même section de mesure a-a.  
(b) Champ magnétique axial.  
(c) Champ magnétique radial dans la section a-a.

Figure 2 Source hélicoïdale en détail.

Figure 3 Profils de densité pour quatre valeurs de la pression du gaz (Hydrogène).

Valeurs du champ magnétique — 4,6 KGauss  
--- 14 KGauss  
--- 21,9 KGauss

Figure 4 Profils de la température électronique pour les mêmes conditions que celles de la fig.3.

Figure 5 Profils de densité pour trois valeurs de la pression du gaz (Argon).

Valeurs du champ magnétique — 4,6 KGauss  
--- 14 KGauss  
--- 21,9 KGauss

Figure 6 Profils de la température électronique pour les mêmes mêmes conditions que celles de la fig.5.

Figure 7 (a) Densité et température maximales en fonction du champ magnétique  $B_z$ , pour quatre valeurs de la pression du gaz (Hydrogène).

(b) Densité et température moyennes en fonction du champ magnétique pour les mêmes conditions que celles de la fig.7(a).

- (c) Densité moyenne d'énergie en fonction du champ magnétique pour les mêmes conditions que celles de la fig.7(a).

*Figure 8* (a) Densité et température maximales en fonction du champ magnétique  $Bz$ , pour trois valeurs de la pression du gaz (Argon).

- (b) Densité et température moyennes en fonction du champ magnétique  $Bz$ , pour les mêmes conditions que celles de la fig.8(a).

- (c) Densité moyenne d'énergie en fonction du champ magnétique  $Bz$  pour les mêmes conditions que celles de la fig.8(a).

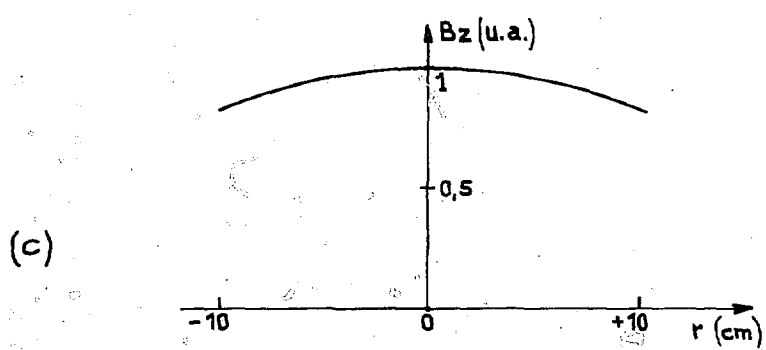
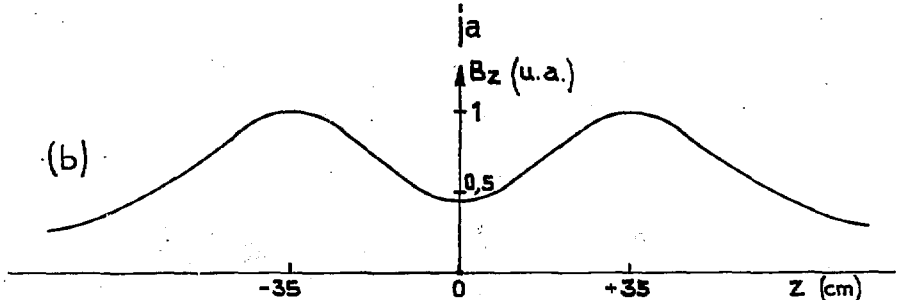
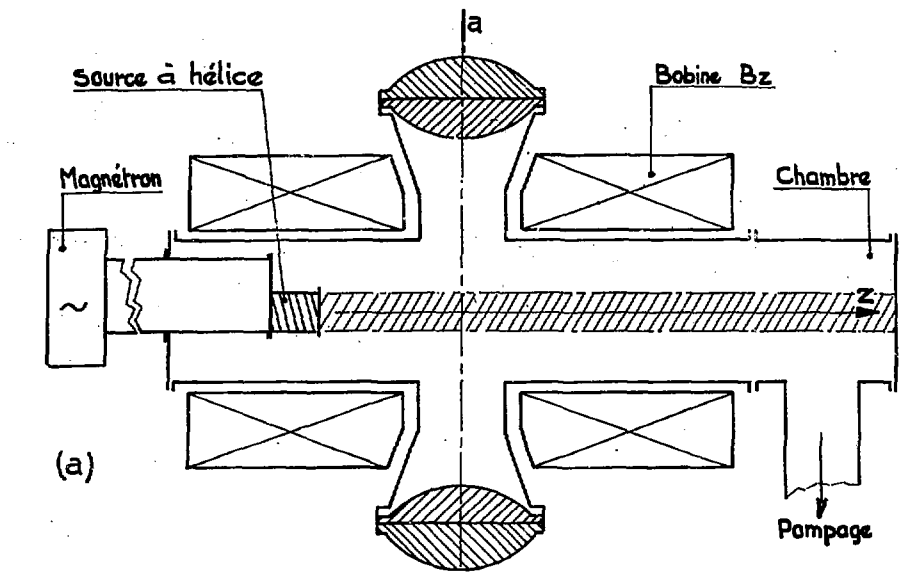


Fig. 1

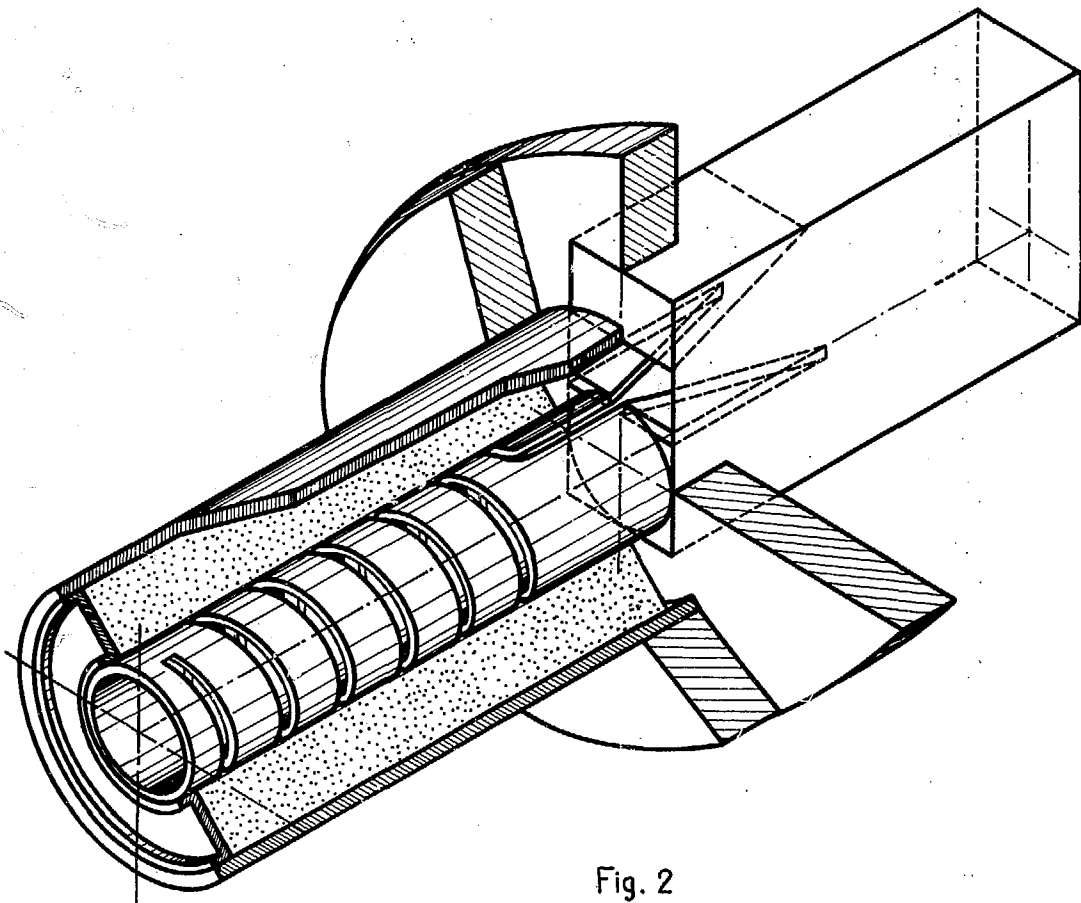


Fig. 2

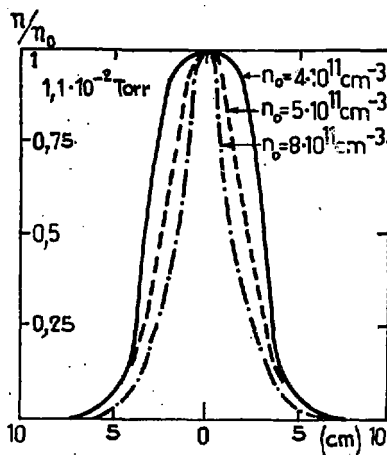
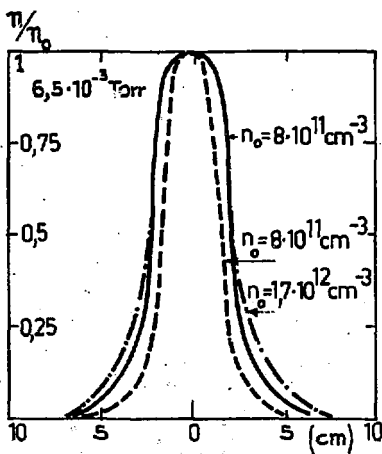
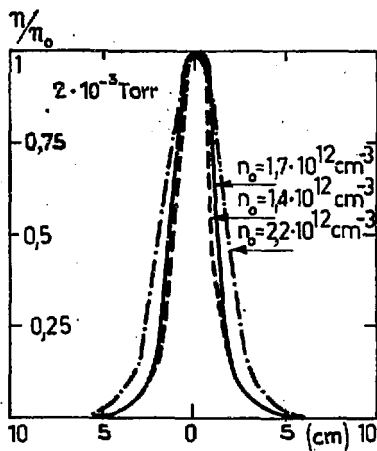
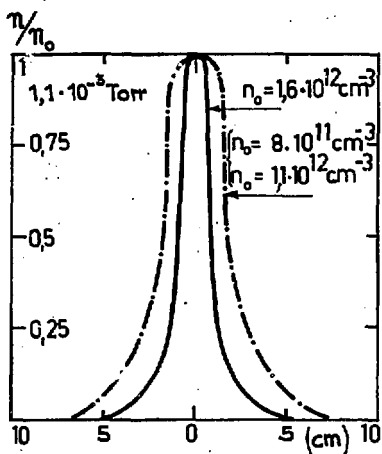


Fig. 3

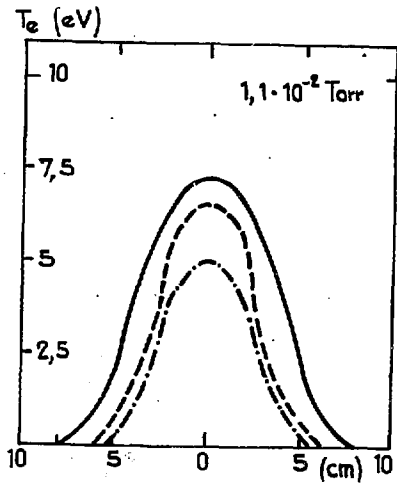
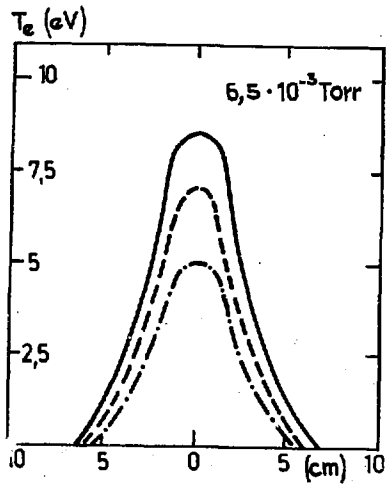
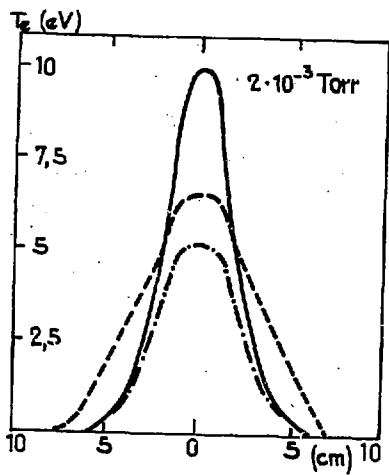
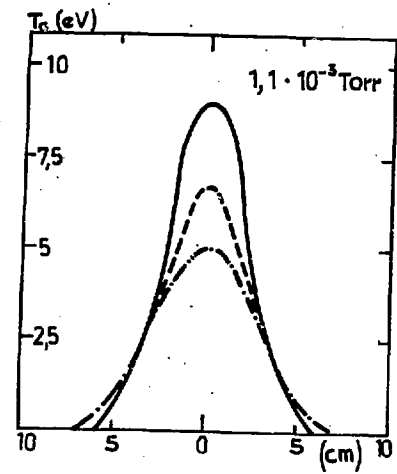


Fig. 4



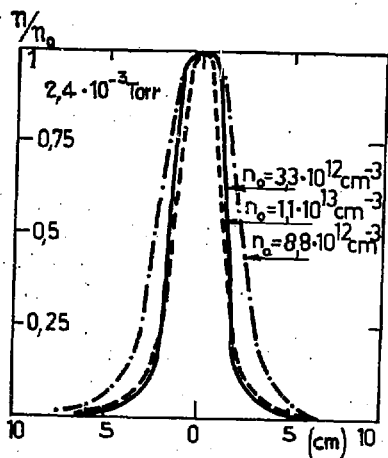
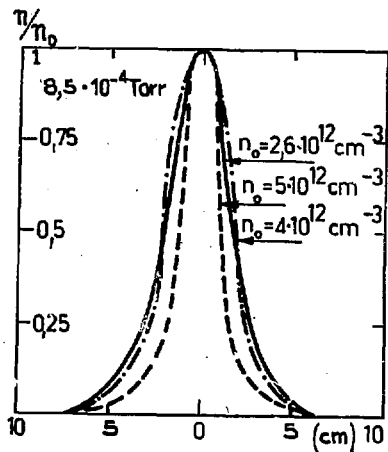
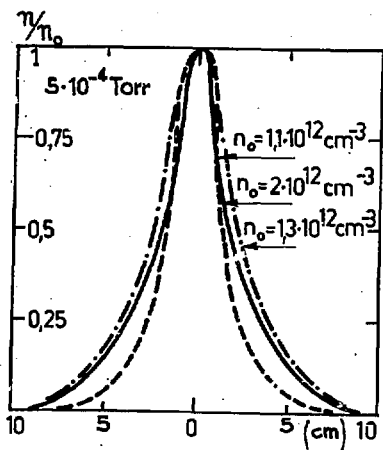


Fig. 5

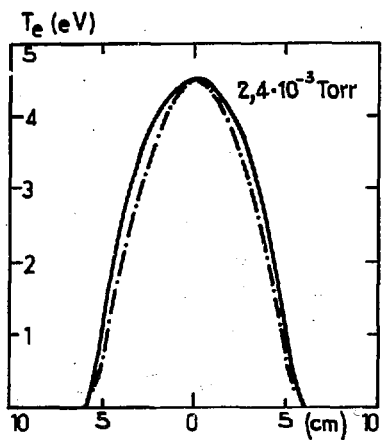
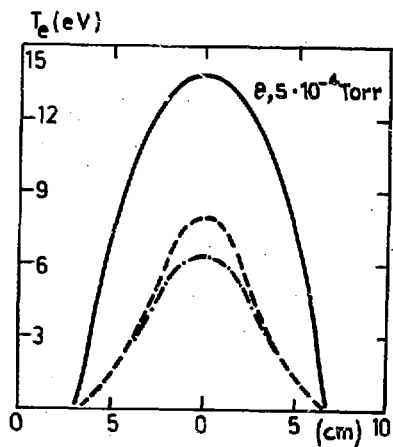
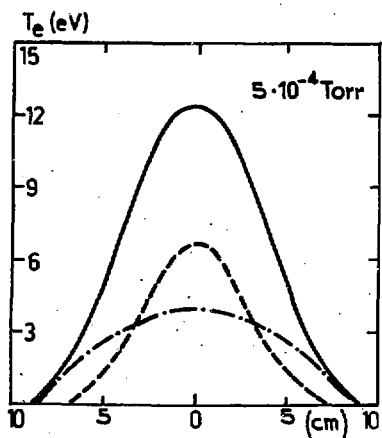
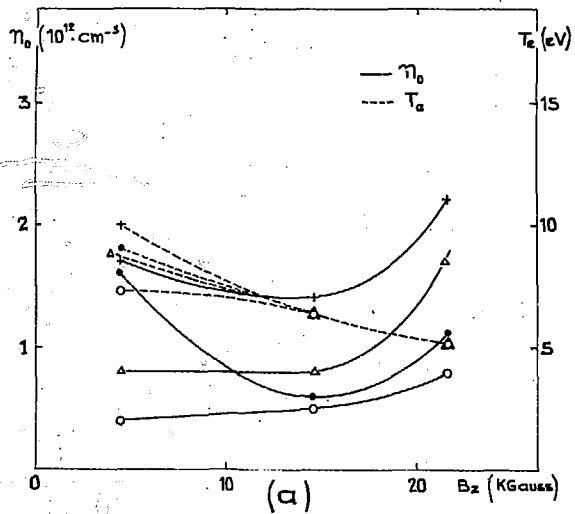


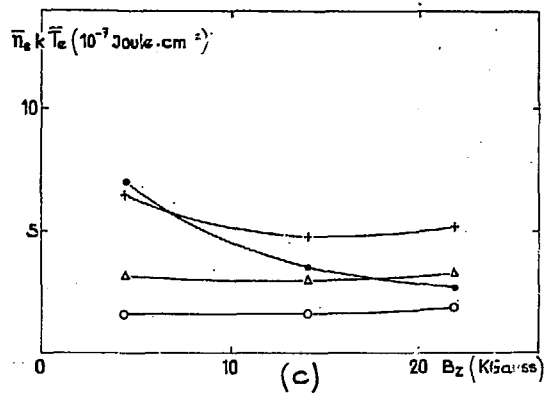
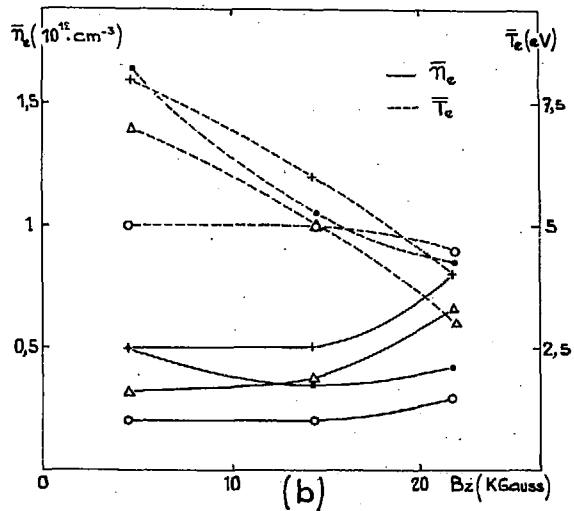
Fig. 6

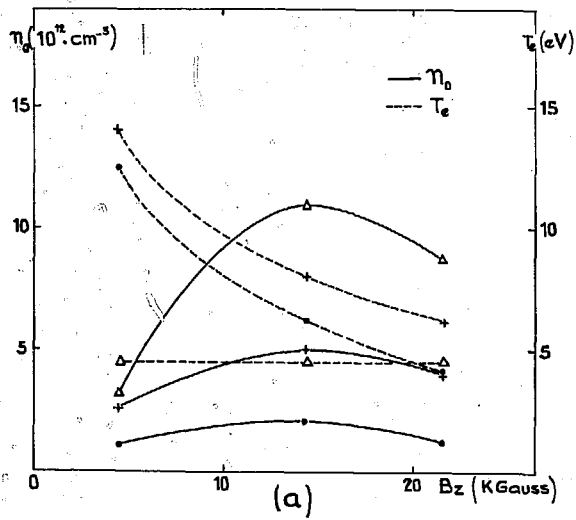


$\text{H}_2$

- $P_0 = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ mm Hg}$
- +  $P_0 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ "}$
- $\Delta$   $P_0 = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ "}$
- $P_0 = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ mm Hg}$

Fig. 7





ARGON

- $P_0 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ mm Hg}$
- +  $P_0 = 8,5 \cdot 10^{-4}$
- △  $P_0 = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ mm Hg}$

Fig. 8

