

CARACTERÍSTICAS DE PROGRAMACIÓN DE CELDAS DE MEMORIA EPROM

Magali Estrada

José Folgueras

ICID

RESUMEN

En el presente trabajo se muestran algunos resultados experimentales de la programación de celdas EPROM, mediante la inyección de electrones acelerados en el canal. Este mecanismo, no obstante ser ampliamente utilizado, se encuentra poco estudiado en la literatura, debido a lo complejo que resulta su análisis por la presencia de dos cam-

pos eléctricos perpendiculares entre sí. En este trabajo se incluyen los resultados obtenidos, explicándolos mediante fenómenos físicos que ocurren en la estructura durante la programación. Se llega a algunas conclusiones útiles para el diseño de las celdas.

ABSTRACT

In this work, some experimental results on the programming of EPROM cells by the injection of electrons accelerated in the channel are shown. This mechanism, although widely employed, has not been very much studied in the literature, on account of the complexity of the analysis due to the existence of two mutually perpendicular electric fields.

The results obtained in this work are presented and explained in terms of the physical phenomena that take place in the structure during programming, arriving to some conclusions useful for the design of the cells.

INTRODUCCIÓN

Existen diferentes mecanismos que permiten inyectar electrones desde el sustrato hacia la compuerta flotante en una estructura MOS [1]. Uno de los más utilizados en las celdas de memoria [2] se basa en la inyección en

el Si O₂ de electrones acelerados en el campo eléctrico a lo largo del canal debido al voltaje entre Drenaje y Fuente (V_{DS}) cuando al mismo tiempo existe un voltaje entre compuerta y sustrato capaz al menos de producir la inversión de éste hasta una distancia de la fuente suficiente para que los electrones alcancen la velocidad de saturación. En este mecanismo se requieren canales cortos para que los electrones puedan alcanzar la velocidad de saturación antes de la aparición del pinch-off [3].

No obstante, la presencia de 2 campos eléctricos perpendiculares entre sí, hace complejo el análisis de este tipo de inyección, no existiendo hasta el momento un modelo teórico para el mismo.

En este trabajo se muestran los resultados experimentales del comportamiento de una estructura como la que se muestra en la Fig. 1, brindándose una explicación cualitativa de los fenómenos físicos que tienen lugar y que permiten interpretar los resultados experimentales, así como llegar a recomendaciones útiles para el diseño de este tipo de celdas.

ESTRUCTURA ANALIZADA

En la fig 1 se muestra la celda EPROM que se estudia en el presente trabajo. Entre el Drenaje y la Fuente se aplica un voltaje suficiente para provocar saturación de

la velocidad de los electrones. El largo del canal se escoge del orden de $3,5 \mu\text{m}$ para lograr que en un determinado rango de valores de V_{DS} y V_{GS} , ocurra la saturación de velocidad de los electrones antes de la aparición de Pinch-off (Ver Fig. 2a)

La inyección de electrones producirá una acumulación de carga negativa junto a la compuerta F, que hará que haya que aplicar un mayor voltaje a la compuerta externa G para que se invierta el canal en la superficie del silicio, variando el voltaje umbral de la estructura (V_{TM}). Este voltaje está relacionado [4] con el voltaje necesario en F para invertir la superficie (V_{T0}) según la expresión (1).

$$V_{TMO} = V_{T0} \frac{C_T}{C_{FG}} \quad (1)$$

donde C_{FG} - capacidad entre F y G

$$C_T = C_F + C_{FD} + C_{FS} + C_{F1} + C_{FG}$$

y C_F - capacidad entre F y el sustrato bajo el óxido fino.

C_{FD} y C_{FS} - capacidad entre F y fuente y drenaje.

C_{F1} - capacidad entre F y sustrato bajo óxido grueso.

A su vez:

$$C_{FG} = l_{pl} \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon_o}{X_0} (l + l_{os} + l_{od})$$

$$C_F + C_{FD} + C_{FS} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_o}{X_2} \cdot Z (l + l_{os} + l_{od})$$

$$y \quad C_{F1} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_o}{X_3} (l_{pl} - Z) (l + l_{od} + l_{os})$$

donde l_{od} y l_{os} - sobrelapamiento de drenaje y fuente respectivamente.

l - largo del canal

l_{pl} - largo del policilicio 1 (F)

Z - ancho del canal

X_2 - espesor del óxido entre F y G

X_3 - espesor del óxido grueso.

$$y \quad V_{TM} = V_{TMO} + \frac{Q_F}{C_{FG}} \quad (2)$$

donde Q_F - la carga inyectada

V_{TMO} - es el voltaje umbral antes del comienzo de la inyección

Una expresión general que relaciona a V_{GS} con el voltaje V_{FS} aplicado a la compuerta flotante es la siguiente [4].

$$V_{FS} = \frac{C_{FG}}{C_T} V_{GS} \left(1 + \frac{C_{FD}}{C_{FG}} \frac{V_{DS}}{V_{GS}} - \frac{Q_F}{C_{FG} V_{GS}} \right) \quad (3)$$

Como puede observarse en (3), el incremento de V_{TM} permite seguir el comportamiento del proceso de inyección.

La programación de las celdas se realizó utilizando un generador de pulsos con 2 salidas independientes para V_{DS} y V_{GS} con amplitud variable entre 0 y 30 V y anchos de pulsos entre 10 y $100 \mu\text{s}$, puede emplearse pulso a pulso o con trenes de 1 a 99 pulsos.

La determinación de V_{TM} se realizó por el método de extrapolación de la curva $I = F(V_{DS})$ para $V_{GS} = V_{DS}$, tomando como valor de V_{TM} el intersección de la curva con el eje de voltaje [4].

En las curvas de las Fig. 3, 4 y 5 se ha representado la variación del voltaje umbral durante la programación con respecto al valor inicial, en función del tiempo para diferentes valores de V_{DS} y V_{GS} .

. En ellos se observa lo siguiente:

- 1) A mayor valor de V_{GS} para un V_{DS} fijo, se obtiene una pendiente inicial de la curva mayor, lo que indica una mayor densidad de corriente de inyección y por lo tanto un menor tiempo para alcanzar un valor dado de V_{TM} , Figs. 3 y 4.
- 2) Para cada V_{GS} se observa un valor de V_{TM} max. que tiene una débil dependencia de V_{DS} [4]. En la Tabla 1 se muestran en detalle estas dos dependencias. También se ha calculado el voltaje mínimo en la compuerta flotante V_{FS} min para el cual se detiene el proceso de inyección y se obtiene el valor máximo de voltaje de umbral. Como se ve este voltaje depende ligeramente de V_{GS} y de V_{DS} .
- 3) En la Fig. 2a. se muestra la curva correspondiente al umbral de la zona de inyección, curva 2. El menor valor de voltaje entre drenaje y fuente para el cual se ob-

servó inyección fue de 9,6V para un valor de V_{GS} de 32V. Mientras que el menor valor de V_{GS} para el cual se observó inyección fue de 14V.

También en este gráfico se ha dibujado la curva teórica correspondiente a la zona de formación de pinch-off y a la saturación de velocidad, curva 1.

En [4] se hace un análisis detallado de este último gráfico, demostrando su buena coincidencia con los valores experimentales medidos, cuando para el mismo se utiliza la expresión de corriente propuesta por Ihantola y Moll [5] y cuando se toma la corrección al modelo del transistor debida a la presencia de la compuerta flotante. En la estructura puede producirse inyección debido a dos mecanismos, el de aceleración en el canal cuando se alcanza la velocidad de saturación antes que el pinch-off y el que se observa cuando hay pinch-off. Esto como se verá posteriormente, determina dos velocidades de variación en el incremento del voltaje umbral de la estructura. El comienzo de la inyección por saturación de velocidad se observa para valores de campo eléctrico longitudinal, ligeramente superiores al campo crítico de 2×10^4 V/cm [3].

Esta curva 1 no permite hacer un análisis del proceso de inyección en la estructura, ya que la misma varía con el tiempo; a medida que se incrementa la carga en la compuerta flotante varía V_{TM} y por lo tanto el valor de V_{GS}

para el cual aparece el Pinch-off. Este inconveniente se elimina dibujando este mismo gráfico en dependencia del voltaje en la compuerta flotante, tal y como se muestra en la Fig. 2b. Esta conversión se realiza utilizando la expresión (3). Esta curva independiente del momento de programación de la celda la utilizaremos para analizar las características dinámicas de programación que se muestran en las Figs. 3, 4, 5.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

1) El menor valor de V_{GS} para el cual se obtiene inyección por saturación de velocidad es del orden de 21V. El voltaje en la compuerta flotante en este caso antes del comienzo de la inyección será del orden de 14V según la expresión (3), para los siguientes parámetros de la estructura: (ver Fig 2b).

Q_{os}, ℓ_{od}	- 1.25 μm
ℓ	- 3.5 μm
ℓ_{p1}	- 18 m
X_2	- 1250 Å
X_3	- 5400 Å
Z	- 6 μm

El campo longitudinal que acelera los electrones hacia el drenaje se obtiene mediante V_{DS} . Para que haya saturación de velocidad el mismo debe ser superior a $2 \cdot 10^4$ V/cm.

Por otro lado el voltaje V_{GS} debe garantizar la formación del canal entre fuente y drenaje al menos hasta la coordenada Y1 donde el voltaje con respecto a la fuente hace que se alcance el campo eléctrico crítico. En este caso esto ocurrirá junto al drenaje prácticamente. Como el potencial en la superficie entre Si y el SiO_2 es $\phi_s = 2 \phi_F + V(Y1)$, el voltaje necesario en la compuerta flotante para lograr la inversión del substrato será $V_{FS} = V_{T0} + V(Y1)$. Como V_{T0} es 3,1 V, $V(Y1) = 11V$ lo que concuerda con el valor experimental de $V_{DS} = 10,5$ V correspondiente a $V_{FS} = 14V$. El menor valor de V_{GS} para el cual ocurre inyección es de 14V pero el mecanismo en este caso es debido al Pinch-off.

2) De la Tabla 1 se observa que el menor valor de V_{FS} para el cual se obtuvo inyección oscila alrededor de un valor de 8,5V y resulta prácticamente el mismo independientemente del régimen en que comienza la inyección de la celda. Por ejemplo, las curvas con $V_{GS} < 21$ V corresponden a programación en el régimen II con formación de Pinch-off todo el tiempo, mientras que para $V_{GS} > 21$ V comienzan con saturación de velocidad y luego pasan a Pinch-off. Esto permite determinar el valor máximo de V_T M_{max} hasta el cual se puede programar una celda dada.

3) En las Fig. 3, 4 y 5 se muestran las curvas de variación de V_{TM} con el tiempo de programación para diferentes valores de V_{DS} y V_{GS} . En ellas se pueden observar las siguientes características. Inicialmente se observa una variación rápida de V_{TM} con el tiempo, luego una zona de transición y por último una zona de incremento más lento de V_{TM} .

La primera zona corresponde al régimen de inyección por saturación de velocidad. Esto debe ocurrir, según la Fig. 2b, para valores de $V_{FS} > 14V$.

Si expresamos este valor a través de V_{GS} y localizamos los puntos en las curvas experimentales, señaladas en las figuras, vemos que se observa una buena concordancia entre el valor previsto y la zona donde ocurre el cambio de pendiente. Si el V_{GS} inicial es lo suficientemente bajo para que V_{FS} esté por debajo de los 14 V la programación ocurrirá todo el tiempo debido al segundo mecanismo (régimen II). Ver curvas para $V_{GS} = 21V$ en la Fig. 3.

La pendiente de la curva en la zona de incremento rápido depende de V_{GS} , ya que en el régimen de saturación de velocidad, el aumento de V_{GS} implica una reducción de la barrera de potencial y por lo tanto aumento de la inyección. En las Fig. 3 y 4 puede observarse esta de-

pendencia.

En la Fig. 6 se ha dibujado un gráfico la variación de V_{TM} con el tiempo en función de un valor de campo E_S que definimos como el voltaje entre drenaje y fuente entre el largo del canal $E_S = V_{DS}/\ell$. Se han trazado como ejemplo curvas para dos V_{GS} diferentes. A través de estas curvas puede determinarse el tiempo de programación de una celda para un largo dado de canal, y viceversa. De lo dicho anteriormente se desprende que, para programar una celda resulta conveniente escoger los parámetros que permitan trabajar en el Régimen I de inyección por saturación de velocidad. Esto puede hacerse utilizando la curva 1 de la Fig. 2b. Debe escogerse un valor de V_{GS} tal que la variación de V_{TM} que se desee obtener al final de la programación ocurra todo el tiempo en el Régimen I. En nuestro caso para ΔV_{TM} de 10 V partiendo de $V_{TM0} = 4,5V$, V_{GS} debe ser superior a los 30 V.

Una vez seleccionado el valor de V_{GS} se ajusta el valor de V_{DS} por las curvas de las Fig. 5 ó 6, partiendo del tiempo deseado de programación. Debe señalarse como un valor razonable de $\Delta V_{TM}/\Delta T = 10^2$ a 10^3 V/s. Los valores del campo E_S pueden encontrarse entre 4×10^6 y $4,6 \times 10^6$ V/cm. Si se aumenta más el campo longitudinal el incremento de V_{TM} con el tiempo tiende a dismi-

nuir, y si lo disminuimos mucho más, entonces se incrementará en forma no permisible el tiempo de programación.

Otro aspecto importante resulta el poder evaluar la influencia de variaciones de los parámetros de la estructura como X_0 y l sobre el régimen de programación. Esto puede hacerse a través de los gráficos de las Fig. 2b y 6. Por ejemplo, una variación de l en $0,5 \mu\text{m}$ puede dar lugar un incremento del tiempo de programación en unas 10 veces, de 23 ms a 220 ms, para $V_{DS} = 15 \text{ V}$ y $V_{GS} = 30\text{V}$.

CONCLUSIONES

En el trabajo se analizan las características experimentales de programación de celdas EPROM. Se muestra la forma de utilizar algunos de los resultados y curvas a las que se llegan para el diseño y análisis de estas celdas.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean dejar constancia de su agradecimiento al C.Dr. Melquiades de Dios Leyva y al C.Dr. Carlos Trallero Giner, ambos de la Fac. de Física Matemática de la Universidad de La Habana por su discusión de algunos aspectos de este trabajo.

Igualmente agradecemos al Lic. J. Mesa la realización del generador de pulsos y parte de las mediciones.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 T.H. Ning, S.S. Electronics V 21 273-282, (1978)
- 2 B. Rössler, IEEE Tran on ED - 24, nº 5, 606-610, (1977)
- 3 S. R. Hofstein, G Warfield, IEEE Tran. on ED, ED-12, Nº3, 129-138, (1965).
- 4 J. Folgueras, M. Estrada, J. Mesa - II Conferencia Científica de la Fac. Físico Matemática U.H.
- 5 H.K.J. Ihantola, J.L. Moll S.S. Electronics V7, 423-430, (1964)

TABLA 1

V_{GS} (V)	$V_{TM}/max.$ (V)	V_{DS} (V)	V_{FS} (V)	$V_{FS\ min}$ (V)
26	17,5	12	17,9	8,73
26	18,5	15	18	8,08
26	18,5	18	18	8,21
26	19,5	24	18,4	7,749
26	19	20	18,2	7,938
31	23	12	21,2	8,1
26	18,5	12	17,9	7,96
31	23	12	21,2	8,1
24	15,5	15	16,7	8,88
24	15	12,5		8,48
24	15,8	15	16,7	8,67
24	15,8	12	16,5	8,55
22	13	12	15,2	8,84
22	13,5	12	15,2	8,92
20	11,5	12	13,9	8,65
18	10	12	12,5	8,52
14	6,6	15	10	8,39
14	6,6	12	9,87	9,19

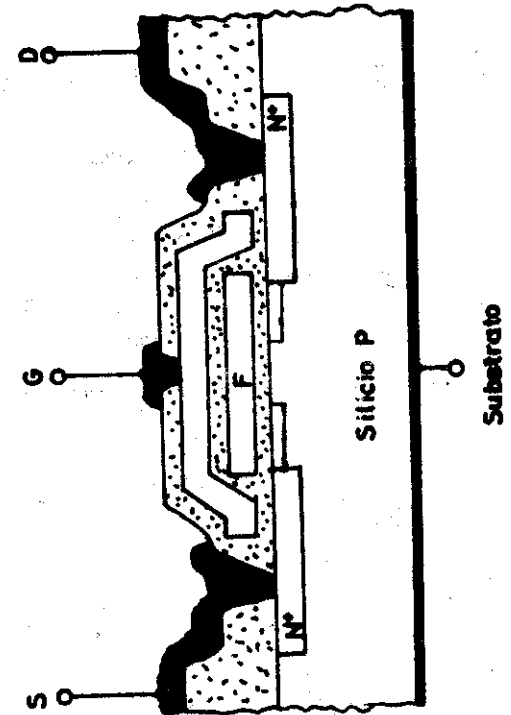
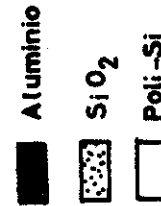


Figura 1

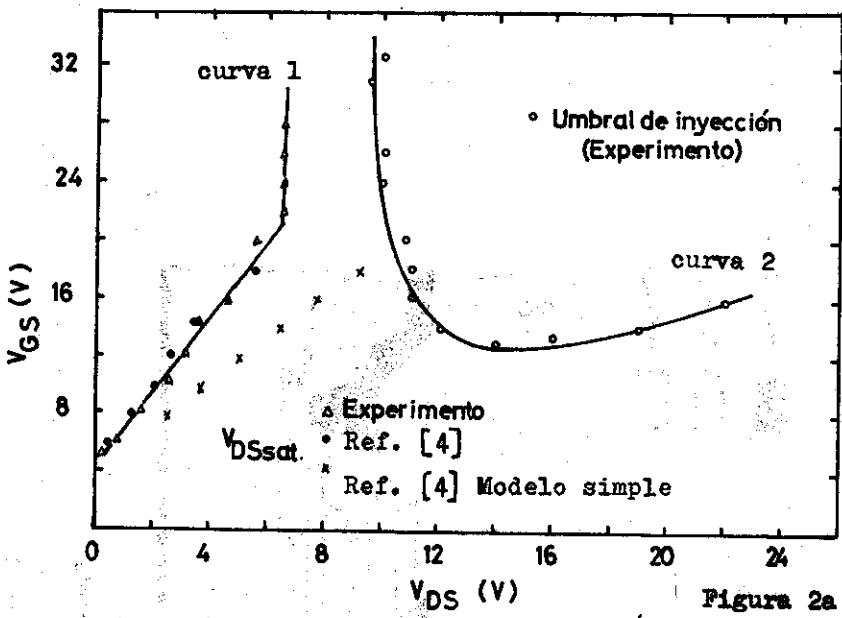


Figura 2a

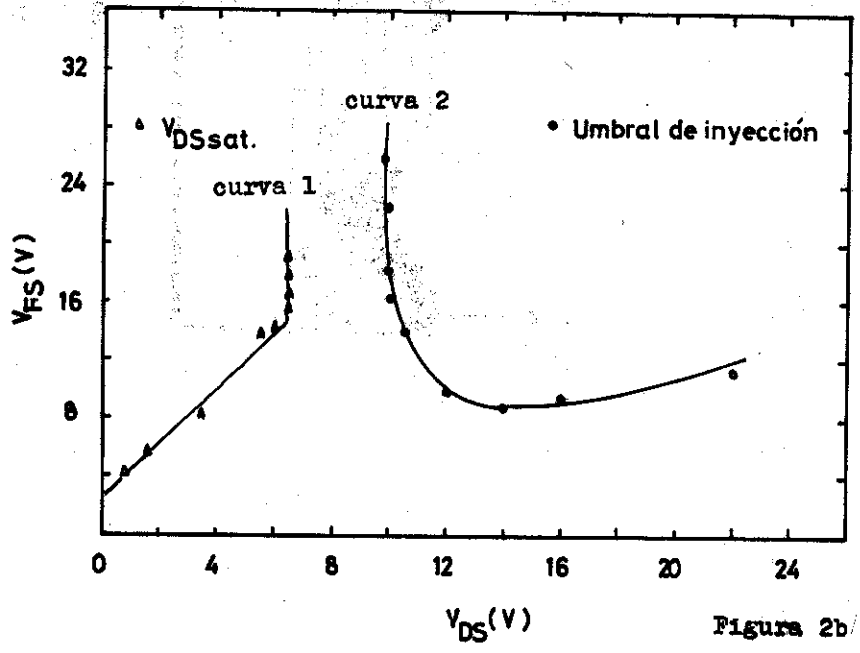
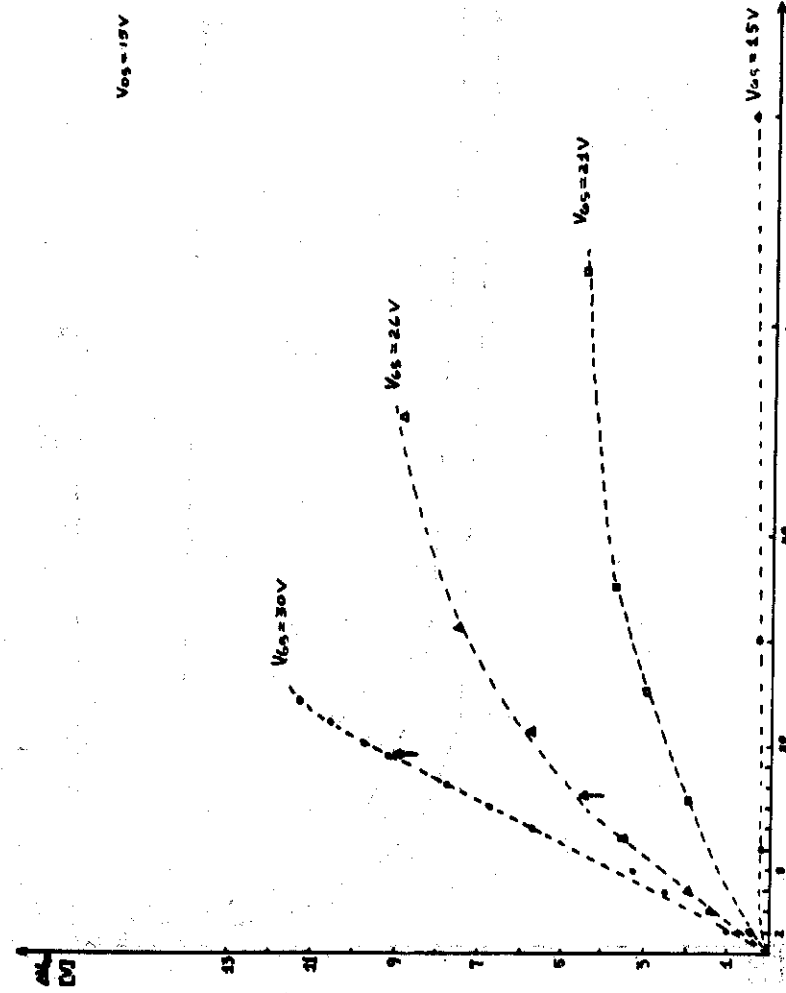
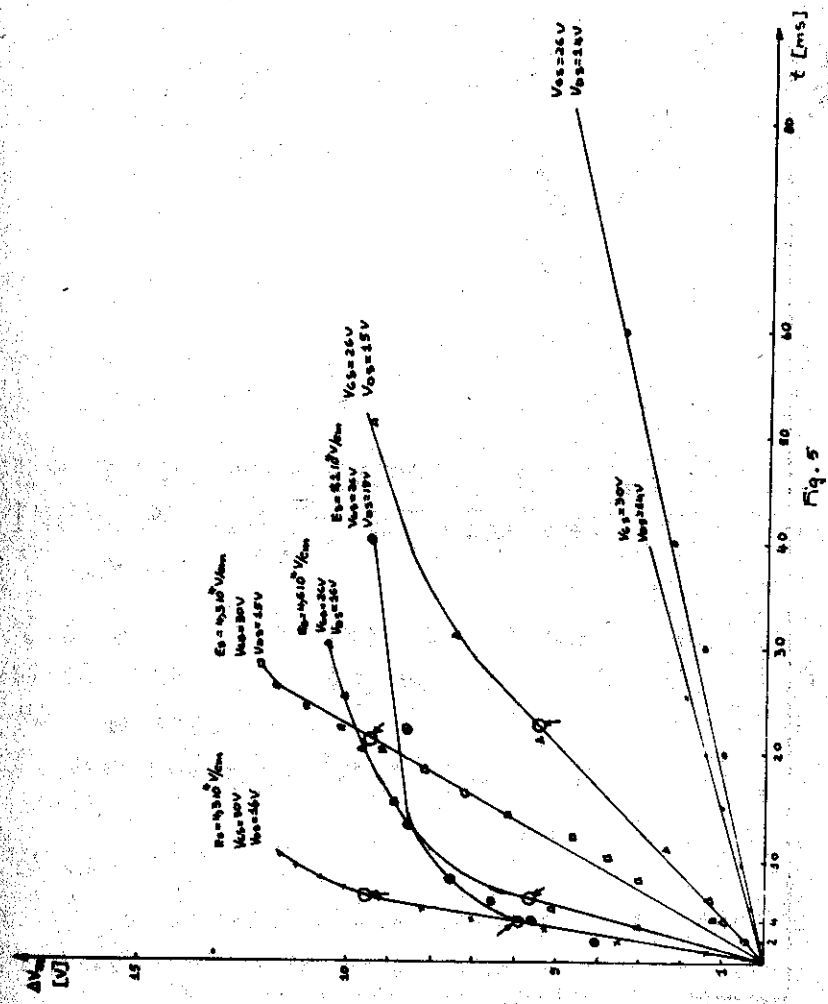
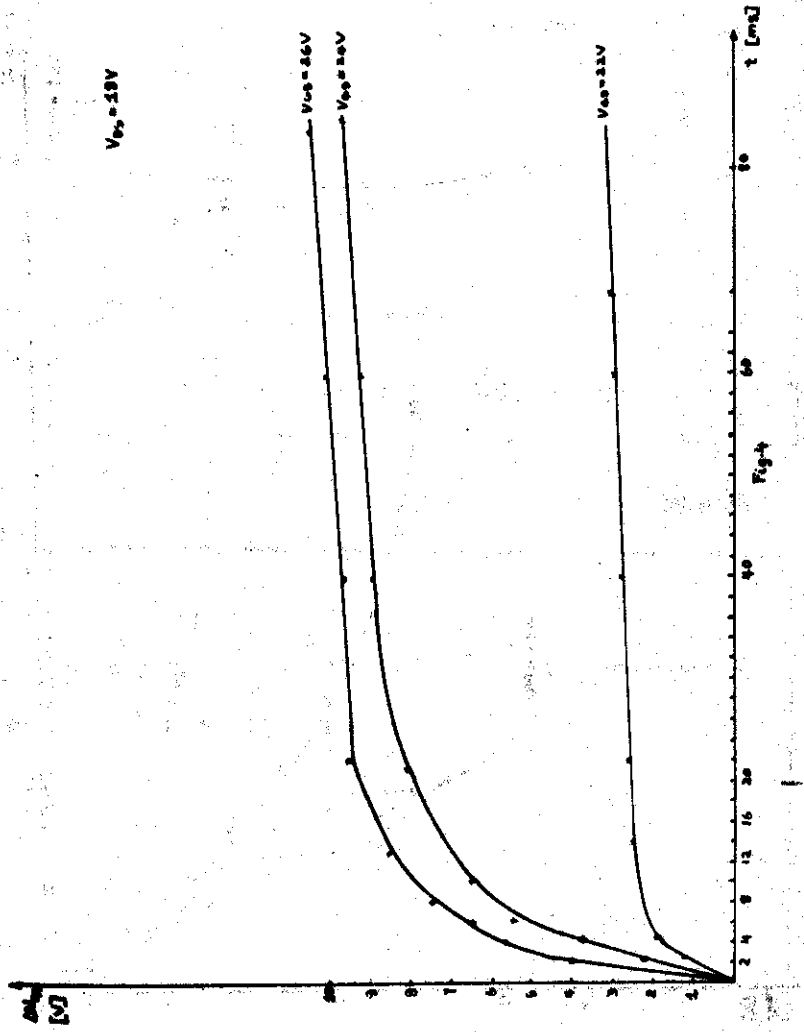


Figura 2b





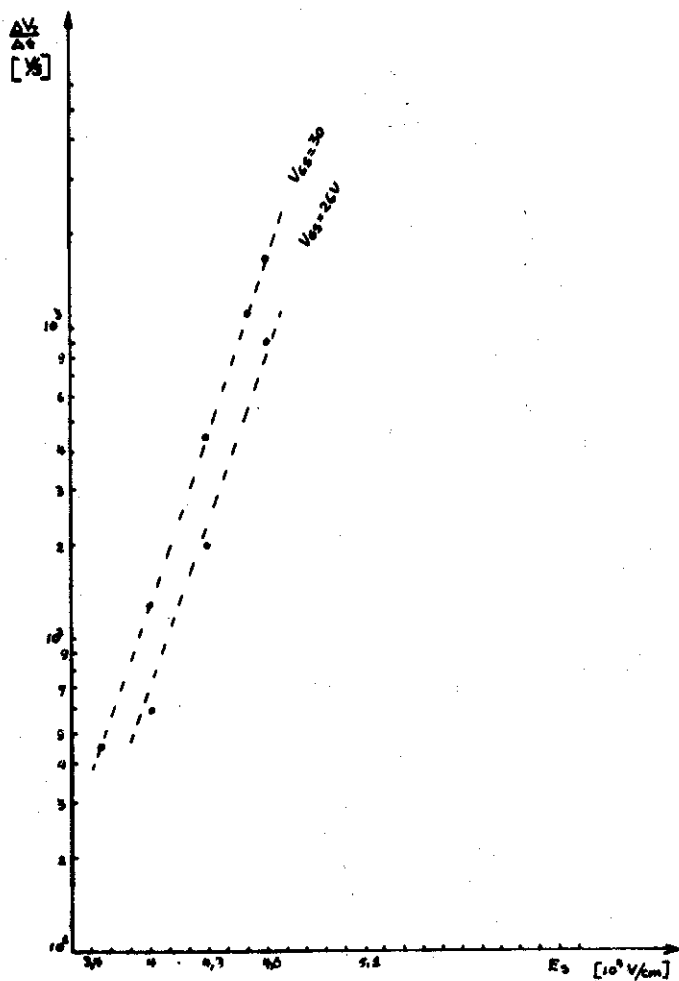


Fig. 6