

EL TRANSISTOR UNIUNION (UJT) Y EL TRANSISTOR UNIUNION PROGRAMABLE (PUT)

5.1. INTRODUCCION

En la práctica anterior vimos un componente, el tiristor, al que se le puede hacer conmutar desde el estado de bloqueo al estado conductor mediante la aplicación de un impulso conveniente en el terminal de puerta. En éste, veremos dos nuevos componentes, el transistor uniunión (UJT) y el transistor uniunión programable (PUT), en los que también tiene lugar un paso brusco del estado de bloqueo al estado conductor, con la diferencia respecto al del tiristor en que este paso se produce cuando una tensión de control rebasa un valor determinado.

5.2. DESCRIPCION BASICA

■ El transistor UJT

El nombre UJT proviene de las siglas inglesas de Unijunction Transistor (transistor uniunión), con las que se designa un elemento compuesto de una barra de silicio tipo *N* de cuyos extremos se obtienen los terminales base 2 (B_2) y base 1 (B_1). Esta barra de silicio consta de un grado de dopado característico que le proporciona una resistencia llamada resistencia interbases (R_{BB}).

En un punto determinado de la barra, más próximo a B_2 que a B_1 , se incrusta un material tipo *P* para formar una unión *P-N* respecto a la barra original, dando lugar al terminal de emisor (*E*). Considerando el lugar de inserción del material tipo *P*, se obtiene un divisor de tensión sobre la resistencia R_{BB} original: el formado por las partes correspondientes de la barra *N* comprendidas entre B_2 y *E* y entre *E* y B_1 . A estas resistencias así obtenidas se las denomina R_{B_1} y R_{B_2} , respectivamente. La relación existente entre ellas es de suma importancia, de manera que se define el parámetro « η » como

$$\eta = \frac{R_{B_1}}{R_{BB}} = \frac{R_{B_1}}{R_{B_1} + R_{B_2}}$$

el cual depende del proceso de fabricación, del grado de dopado, de la geometría del elemento, etc. El fabricante suele proporcionar este dato entre sus hojas de especificaciones.

La Figura 5.1a muestra la estructura interna de un UJT, siendo su circuito equivalente el de la Figura 5.1b. El símbolo usual para este transistor se representa en la Figura 5.1c, en el que se observa que la punta de la flecha apunta hacia el terminal B_1 .

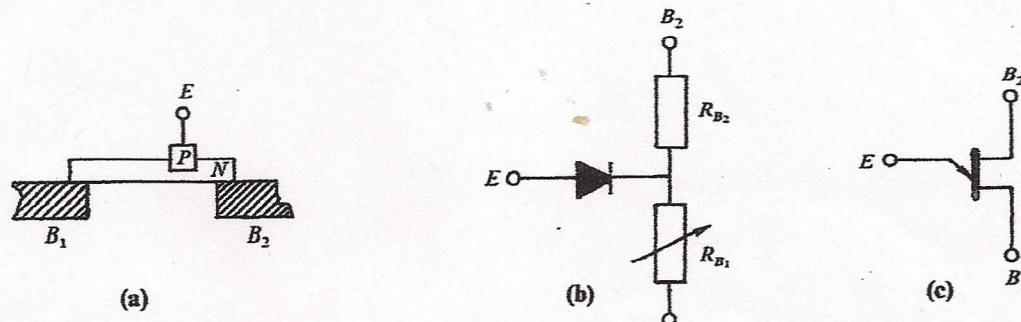


Figura 5.1. El transistor UJT: (a) Estructura física. (b) Circuito equivalente.
(c) Símbolo más usual.

Tal como se ve en el circuito de la Figura 5.2, la forma habitual de polarizar al UJT es mediante dos baterías, una (V_{BB}) que polariza a las bases y la otra (V_{EE}) para la unión $E-B_1$, con la que se dota a dicha unión de una polarización directa. Este circuito nos servirá para obtener las curvas características del UJT.

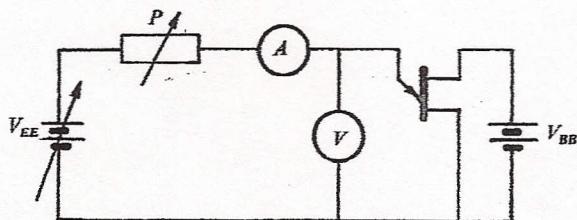


Figura 5.2. Circuito para obtener las curvas características del UJT.

En principio supondremos que el potenciómetro P es un cortocircuito. Si inicialmente se hace $V_{BB} = 0$ y se aumenta progresivamente la tensión V_{EE} , la unión $E-B_1$ se comporta como un diodo polarizado en directo.

El funcionamiento difiere notablemente cuando V_{BB} es distinta de cero. En este caso, y para una tensión $V_{EE} = 0$, circulará una corriente a través de la barra de silicio de valor tal, que en el cátodo del diodo se obtendrá una tensión

$$V_K = V_{BB} \frac{R_{B_1}}{R_{B_1} + R_{B_2}} = \eta \cdot V_{BB}$$

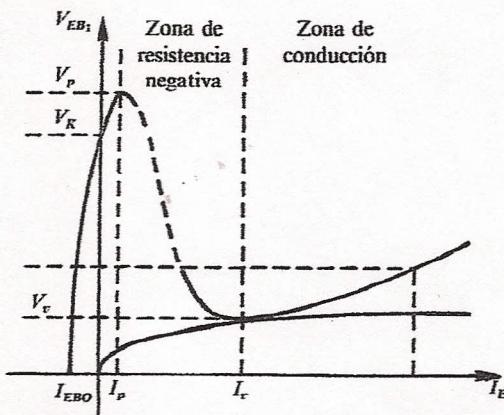
quedando, por tanto, la unión $P-N$ polarizada en inverso y circulando una corriente inversa de emisor. Conforme se aumenta la tensión V_{EE} , disminuye la polarización inversa del diodo y, consecuentemente, la corriente de emisor, hasta llegar a un punto en el que no circula corriente: esta tensión V_{EE} será de valor igual a V_K .

Si se continúa aumentando V_{EE} , el diodo queda polarizado en directo, comenzando a circular una corriente de emisor, y cuando la tensión V_{EE} alcanza el valor V_p más los 0,7 voltios correspondientes a la tensión de codo del diodo, el emisor inyecta portadores en la región N de aquél, modulando la resistencia R_{B_1} , con lo que ésta disminuye de valor hasta prácticamente desaparecer. En ese momento, la tensión V_{EB_1} cae bruscamente, aumentando I_E con la misma rapidez: se ha producido el cebado del UJT.

A la tensión V_{EB_1} correspondiente al cebado se la conoce como *tensión de pico* (V_p) y tiene como valor

$$V_p = \eta \cdot V_{BB} + 0,7$$

De la expresión anterior se deduce que la tensión de cebado del UJT depende de la tensión de alimentación (V_{BB}), con lo que variando ésta conseguiremos igualmente variar la tensión de pico. En la Gráfica 5.1 se observa el punto de pico del UJT para una tensión V_{BB} dada, indicándose con líneas de trazos el cebado del elemento. A esta zona se la conoce con el nombre de zona de *resistencia negativa*.



Gráfica 5.1. Curvas características del UJT.

Una vez cebado el UJT, si se aumenta el valor de P la corriente I_E disminuirá gradualmente, manteniéndose prácticamente constante la tensión V_{EB_1} hasta llegar a un punto de P tal, que la corriente I_E pasa por debajo del valor I_v , llamado de valle, momento en el que se produce un paso del UJT al estado de bloqueo, aumentando V_{EB_1} y disminuyendo I_E hasta el valor de la corriente de fuga del diodo.

■ El transistor PUT

Con las siglas PUT de Programmable Unijunction Transistor (transistor uniunión programable) se designa a un elemento cuyo comportamiento es similar al UJT, con la diferencia respecto a éste de que la relación η puede *programarse* mediante un divisor de tensión exterior.

A pesar de llamarse transistor, su estructura es la de un tiristor en el que el terminal de puerta G se toma del lado del ánodo en lugar del de cátodo. En la Figura 5.3a se representa la estructura interna del elemento y en la Figura 5.3b su símbolo.

Al terminal de puerta, para diferenciarle de los tiristores, se le suele denominar *puerta anódica* (G_A).

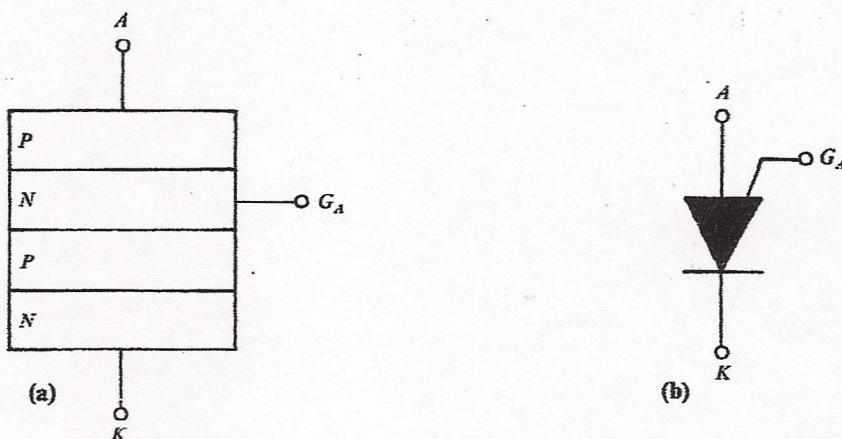


Figura 5.3. El transistor PUT. (a) Estructura interna. (b) Símbolo.

La forma típica de polarizar al PUT se muestra en la Figura 5.4a, en la que se observa el divisor de tensión de puerta formado por R_1 y P . Aplicando el teorema de Thévenin al terminal de puerta, se obtiene el circuito equivalente (Fig. 5.4b), en el que el valor de V_S y R_G vienen determinados por las expresiones

$$V_S = \frac{P}{P + R_1} \cdot V_{GG} \quad y \quad R_G = \frac{R_1 \cdot P}{R_1 + P}$$

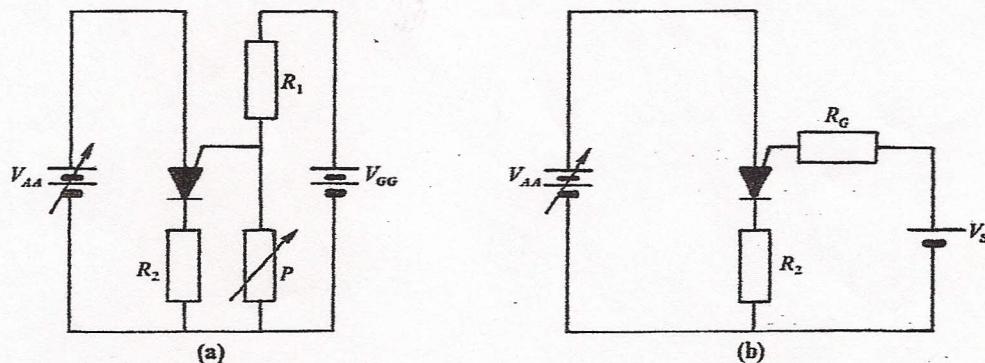
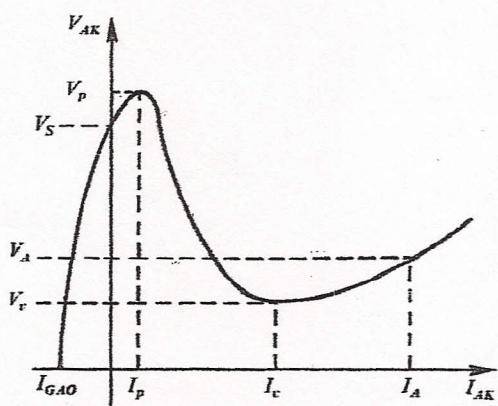


Figura 5.4. Polarización del PUT. (a) Circuito completo. (b) Circuito equivalente.

Para una V_S determinada y mientras V_{AA} permanezca inferior a aquélla, la corriente de ánodo (I_A) es prácticamente despreciable, estando el PUT en estado de bloqueo. Si la tensión V_{AA} supera en cierta cantidad (llamada tensión de offset: V_{offset}) a V_S , se produce una inyección de portadores en el diodo formado por A y G_A , dando lugar a un efecto de avalancha que provoca el cebado del PUT. Al valor V_{AK} necesario para provocar este cebado se le llama tensión de pico (V_p), por analogía con el UJT.

Una vez cebado el PUT, si se reduce la tensión V_{AA} , de manera que la corriente de ánodo pase por debajo de un valor llamado de valle (I_v), se produce el paso al estado de bloqueo, al igual que ocurría en el UJT.

En la Gráfica 5.2 se representa la curva característica del PUT, en la que I_{GA0} representa la corriente inversa de la unión ánodo-puerta, estando el terminal de cátodo abierto.



Gráfica 5.2. Curva característica del PUT para unas R_G y V_S dadas.

Una vez visto el comportamiento básico de ambos elementos pasaremos a estudiar su principal aplicación: la de generador de relajación.

5.3. FUNCIONAMIENTO

■ Oscilador de relajación con UJT

En la Figura 5.5 se representa un circuito típico de oscilador de relajación con UJT y en el que la resistencia R_2 cumple la función de estabilizar térmicamente al transistor. La Gráfica 5.3 muestra las formas de onda de salida de este circuito.

Al conectar la alimentación, el condensador C se empieza a cargar a través de $R_1 + P$ con una velocidad determinada por la constante de tiempo de estos elementos según la expresión

$$V_C = V_{BB}(1 - e^{-t/\tau})$$

Transcurrido un tiempo determinado t_s , la tensión V_C será igual al valor de pico del UJT, con lo que éste se cebará, dando lugar a una corriente de emisor y provocando la descarga de C a través de R_3 : en la salida V_{o2} aparece un pulso de tensión.

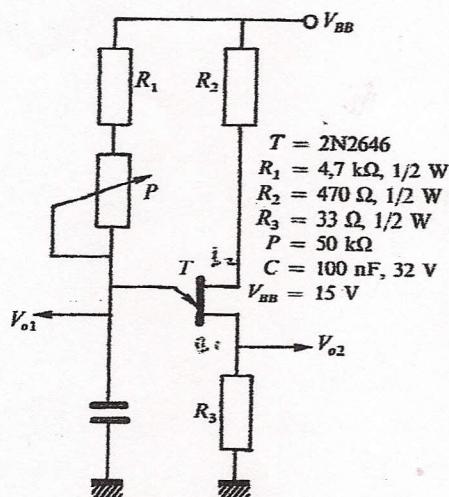
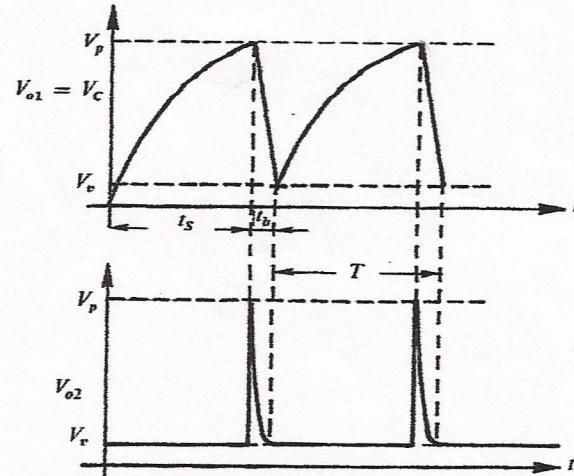


Figura 5.5. Oscilador de relajación con UJT.



Gráfica 5.3. Formas de onda del circuito de la Figura 5.5.

De la expresión anterior de carga del condensador se puede obtener el tiempo que tarda C en alcanzar la tensión V_p mediante

$$t_s = - \left[(R_1 + P) \cdot C \cdot \ln \left(1 - \frac{V_p}{V_{BB}} \right) \right]$$

Si lo que se pretende es diseñar un circuito para que el flanco de subida del diente de sierra dure un tiempo t_s determinado, bastará fijar el valor de uno de los componentes (normalmente C) para obtener el otro en función de él, mediante la expresión

$$R_1 + P = \frac{t_s}{C \cdot \ln \left(1 - \frac{V_p}{V_{BB}} \right)}$$

Ahora bien, conforme se descarga C , el valor de I_E pasa por debajo del valor I_v , pasando el UJT, por tanto, al estado de bloqueo e iniciándose con ello un nuevo ciclo. El tiempo t_b durante el cual se descarga C se obtiene de la expresión de descarga de un condensador a través de una resistencia, es decir, de

$$V_C = V_{\max} \cdot e^{-t/b}$$

pero V_C había alcanzado la tensión V_p y se descargará hasta la tensión de valle del UJT, modificándose por tanto la expresión anterior a la forma

$$V_v = V_p \cdot e^{-t/b}$$

por otra parte, la tensión V_v corresponde al codo de un diodo polarizado en directo y, admitiendo que este valor sea de 0,7 V, entonces

$$0,7 = V_p \cdot e^{-t/b}$$

luego, siendo $\tau = R_3 \cdot C$ y despejando t_b , se obtiene

$$t_b = -[R_3 \cdot C \cdot (\ln 0,7 - \ln V_p)]$$

Si se desea calcular el valor de R_3 (aunque normalmente se hace lo suficientemente bajo como para despreciar el tiempo de descarga de C) para que t_b tenga un valor prefijado, bastará despejarla de la ecuación anterior, así

$$R_3 = -\frac{t_b}{C \cdot (\ln 0,7 - \ln V_p)}$$

Considerando que el período T de la onda de salida es la suma de t_s y t_b y que este último suele ser despreciable frente a t_s , se obtiene la frecuencia de oscilación del circuito

$$f = \frac{1}{T} \approx \frac{1}{t_s}$$

despreciando los 0,7 V se puede hacer $V_p \approx \eta \cdot V_{BB}$ para sustituirlo en la expresión de t_s y aplicando las propiedades de los logaritmos, nos queda

$$f \approx \frac{1}{t_s} \approx \frac{1}{(R_1 + P) \cdot C \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - \eta} \right)}$$

ecuación que nos da, con bastante aproximación, la frecuencia de oscilación del circuito.

Por último, añadir que la resistencia R_1 en serie con P es necesaria, porque la recta de carga del conjunto ha de cortar obligatoriamente a la gráfica del UJT en tres puntos para que éste bascule, siendo el límite superior de P el correspondiente a una intensidad superior a la I_p del UJT, para que tenga lugar el paso del estado de bloqueo al estado conductor.

■ Oscilador de relajación con PUT

En la Figura 5.6 se representa un circuito típico de este tipo de oscilador, en el que puede comprobarse un gran parecido al anterior, con la única diferencia del divisor de tensión formado por R_3 y P que, como se ha dicho anteriormente, permite *programar* la tensión a la que se produce el cebado del PUT, siendo, por tanto, este circuito más flexible en su utilización que su equivalente con UJT. Las formas de onda de las tensiones de salida del circuito no se han representado debido a su gran semejanza con las dibujadas en la Gráfica 5.3, refiriéndonos a estas últimas en la explicación del funcionamiento del circuito.

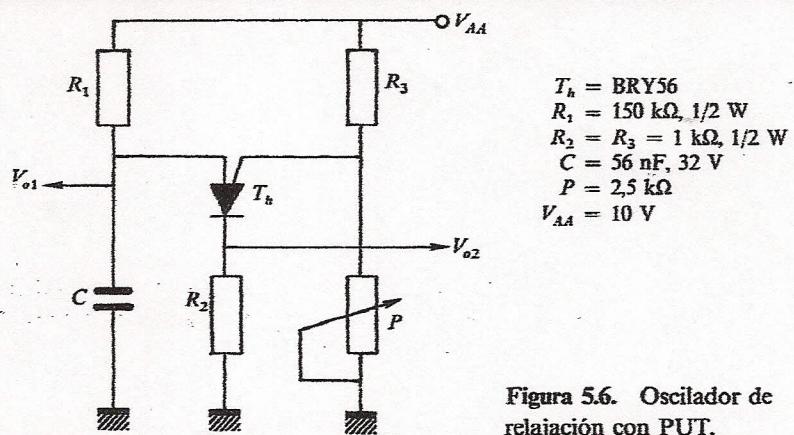


Figura 5.6. Oscilador de relajación con PUT.

Al conectar la alimentación, el terminal de puerta queda aplicado a un potencial determinado por R_3 y P de valor

$$V_S = V_{AA} \frac{P}{R_3 + P}$$

por otra parte, el condensador C se empieza a cargar a través de R_1 , apareciendo entre sus extremos una tensión

$$V_C = V_{AA} \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

Esta carga de C continúa hasta que se alcanza la tensión V_p , momento en el que se produce el cebado de PUT y provocando la descarga del condensador. Como ya sabemos, la tensión V_p es igual a la suma de V_{offset} más V_S , pero en la mayoría de las ocasiones V_{offset} es de un valor suficientemente pequeño como para poder despreciarse, así pues

$$V_S = V_{AA} \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

y despejando el tiempo necesario para alcanzar V_S

$$t_S = -R_1 \cdot C \cdot \ln \left(1 - \frac{V_S}{V_{AA}} \right)$$

o lo que es igual

$$t_S = -R_1 \cdot C \cdot \ln \left(1 - \frac{P}{R_3 + P} \right)$$

expresión en la que se ve que este tiempo es independiente de la tensión de alimentación y que únicamente depende de la constante de tiempo y del divisor de tensión formado por R_3 y P .

Si se desea diseñar un oscilador para un t_S determinado, bastará fijar C y obtener R_1 en función de él, como se vio en el circuito anterior.

Una vez cebado el PUT, el condensador se descarga a través de R_2 hasta que I_A pasa por debajo de la corriente I_b , momento en el que empezaría un nuevo ciclo.

Considerando que la tensión a la que se había cargado C en el momento del cebado es igual a V_S y que en el instante del descebado del PUT la tensión V_C sea igual a la V_{AK} de conducción, se tiene que

$$V_{AK} = V_S \cdot e^{-t/\tau}$$

ahora bien, V_{AK} es un dato que suele dar el fabricante, que para el BRY56 corresponde a 1,4 V, así pues, despejando el tiempo que tarda en producirse la descarga de C , se obtiene

$$t_b = -R_2 \cdot C \cdot (\ln 1,4 - \ln V_S)$$

siendo el tiempo total del diente de sierra el correspondiente a

$$T = t_S + t_b$$

Al igual que ocurría en el caso del UJT, el valor de R_2 suele ser muy pequeño en comparación con R_1 , pudiéndose despreciar por tanto t_b ; la frecuencia de oscilación del circuito vendrá dada por la expresión

$$f = \frac{1}{T} \simeq \frac{1}{t_S}$$