

ESTUDIOS EN PLASMAS DE ALTA DENSIDAD
I. CARACTERISTICAS DE OPERACION DE UN OBTURADOR
ELECTROOPTICO RAPIDO

W.H. Fonseca Araujo y M. Vázquez Reyna *

Laboratorio de Plasmas,

Comisión Nacional de Energía Nuclear

(Recibido: 16 diciembre 1967)

ABSTRACT

A fast light shutter using the electrooptical Kerr effect in nitrobenzene is described. It was developed to make observations on electrical discharges through low pressure gases.

The shutter opening is synchronized with the electrical discharge and can occur between $1\mu s$ and $10000\mu s$ after the discharge starts.

The aperture time can practically be any from the actual minimum of $5ns$; the device has been satisfactorily operated only in the interval from 80 to 500 ns.

* Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, I. P. N., México.

RESUMEN

Se describe un obturador de luz rápido basado en el efecto electroóptico de Kerr del nitrobenzono, desarrollado para realizar observaciones en descargas eléctricas intensas a través de gases a baja presión.

La apertura del obturador está sincronizada con la descarga eléctrica y puede efectuarse en cualquier instante comprendido entre $1\mu\text{s}$ y $10000\mu\text{s}$ a partir del momento en que se inicia la descarga.

El tiempo de apertura obtenible puede ser prácticamente cualquiera desde el mínimo actual de 5 ns pero se le ha operado en la región de 80 a 500 ns durante la determinación de la exposición adecuada.

INTRODUCCION

Se han desarrollado tres dispositivos principales¹ para obtener fotografías de fenómenos rápidos como en el caso de la descarga eléctrica en gases: cámaras de espejo rotatorio, celdas de Kerr y convertidores de imagen.

Con la celda de Kerr se han obtenido² hasta 12 fotografías sucesivas de un objeto luminoso introduciendo retardos ópticos, pero la condición usual es la que permite obtener sólo una fotografía a la vez. Los tiempos de exposición mínimos son del orden de 5 ns y la resolución que se obtiene varía entre 20 y 40 líneas/mm.

Este dispositivo introduce una atenuación alta, por lo que sólo se puede usar con altas intensidades de luz provenientes del objeto. En este aspecto el convertidor de imagen es mejor, sin embargo la celda de Kerr tiene menos dificultades de realización que los otros dos dispositivos mencionados.

DISPOSITIVO OBTURADOR

El dispositivo obturador está constituido por la celda de Kerr propiamente dicha y un circuito productor de un pulso eléctrico de gran amplitud y corta duración.

La operación de la celda de Kerr se basa^{3,4} en el fenómeno de birrefringencia inducida por campo eléctrico que aparece en ciertos líquidos como el nitrobeneno y es la siguiente:

La luz emitida por el objeto O (Fig. 1) se polariza mediante el polarizador P y atraviesa el medio birrefringente. Si la intensidad de campo eléctrico E en este medio y la longitud de las placas son adecuadas, el plano de polarización de la luz emergente del polarizador P gira 90° durante su tránsito a través del medio birrefringente y pasa por el analizador A cuya dirección de polarización forma un ángulo de 90° respecto de la dirección de polarización del polarizador P.

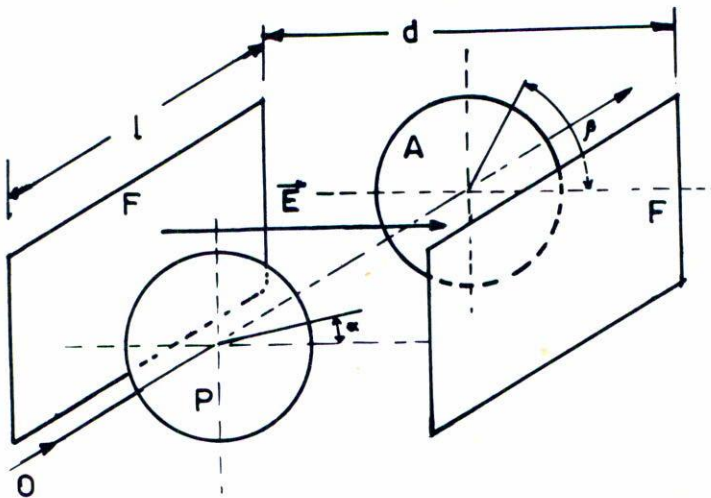


Figura 1. Diagrama esquemático de una celda de Kerr.

Cuando se desprecia la absorción del medio y la dispersión de las líneas del campo E en las orillas, la transmisión se expresa^{3,4}:

$$T = \frac{1}{2} [\cos^2(\beta - \alpha) - \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin^2(\pi I K E^2)] \quad (1)$$

donde α es el ángulo de la dirección de polarización del polarizador P respecto a la dirección del campo E , β el ángulo de la dirección de polarización del polarizador A respecto a la misma dirección, l la longitud de las placas F, K la llamada constante de Kerr del medio birrefringente y E la intensidad de campo eléctrico.

Para el caso del obturador fotográfico es necesario que la transmisión sea nula cuando el campo también lo es, por lo que se escoge $\beta - \alpha = \frac{\pi}{2}$

De la ecuación (1) también puede verse que la transmisión es máxima si $\alpha = (2n-1) \frac{\pi}{4}$ y si $lKE^2 = \frac{1}{2}$

De donde el voltaje de apertura máxima es

$$V_a = \frac{300d}{\sqrt{2Kl}} \quad \text{Volts.} \quad (2)$$

en donde d es la distancia entre placas en cm y l la longitud de las placas en cm.

La ecuación (1) expresada en función del potencial aplicado V a las placas y el potencial de apertura máxima V_a para $\alpha = (2n-1) \frac{\pi}{4}$ y $\beta - \alpha = \frac{\pi}{2}$ se reduce a

$$T = \frac{1}{2} \operatorname{sen}^2 \frac{\pi}{2} \left(\frac{V}{V_a} \right)^2 \quad (3)$$

Además de en el nitrobenzono el fenómeno de birrefringencia inducida por campo eléctrico aparece en el fenilisotiocianato⁵ en forma importante. Las propiedades de interés de estas sustancias son la constante de Kerr y la respuesta espectral. El nitrobenzono tiene la constante de Kerr más alta conocida y la del fenilisotiocianato es 1/3 de aquella; en cambio la respuesta espectral del nitrobenzono es mala en la región del azul y ultravioleta y la del fenilisotiocianato es buena en todo el espectro visible.

La celda se construyó de vidrio pyrex con los electrodos sujetos con soldadura wolframio-vidrio y las ventanas de vidrio plano a $1/2\lambda$ se sujetaron con un epoxy inerte frente al nitrobenzono.

Los electrodos son placas de forma cuadrada de 30x30mm y están separados entre si 15 mm.

El potencial necesario para producir apertura total es del orden de 29 kV. La capacitancia entre electrodos en presencia del nitrobenzeno es de 30 pF.

El campo angular que se obtuvo es 16° .

Los polarizadores utilizados son del tipo dicroico HN-22 de Polaroid. Su transmitancia es 10% cuando sus direcciones de polarización coinciden. La relación de luz transmitida con obturador abierto a luz transmitida con obturador cerrado es 4×10^3 .

La transmitancia total de la celda en condición de obturador abierto es 4%. La celda terminada se muestra en la Fig. 2.

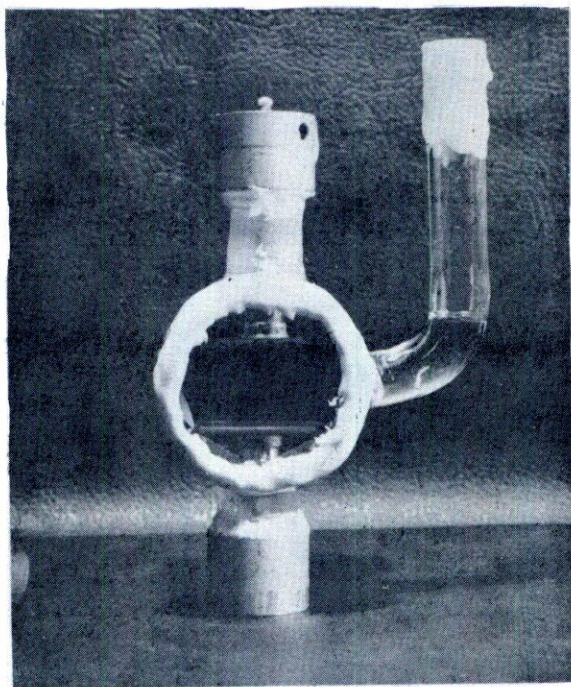


Figura 2. Celda de Kerr terminada

El generador de pulsos necesario se diseñó utilizando las técnicas usuales en radar⁶ y atendiendo a las siguientes consideraciones:

- Se deben producir pulsos rectangulares de 30kV de altura y de 60 a 300ns de duración con tiempos de formación de 10 a 50ns.
- La carga sobre la que estos pulsos se aplican es capacitiva.
- Las variaciones en el tiempo en que el pulso se produce deben ser mínimas.

El circuito empleado se ilustra en la Fig. 3.

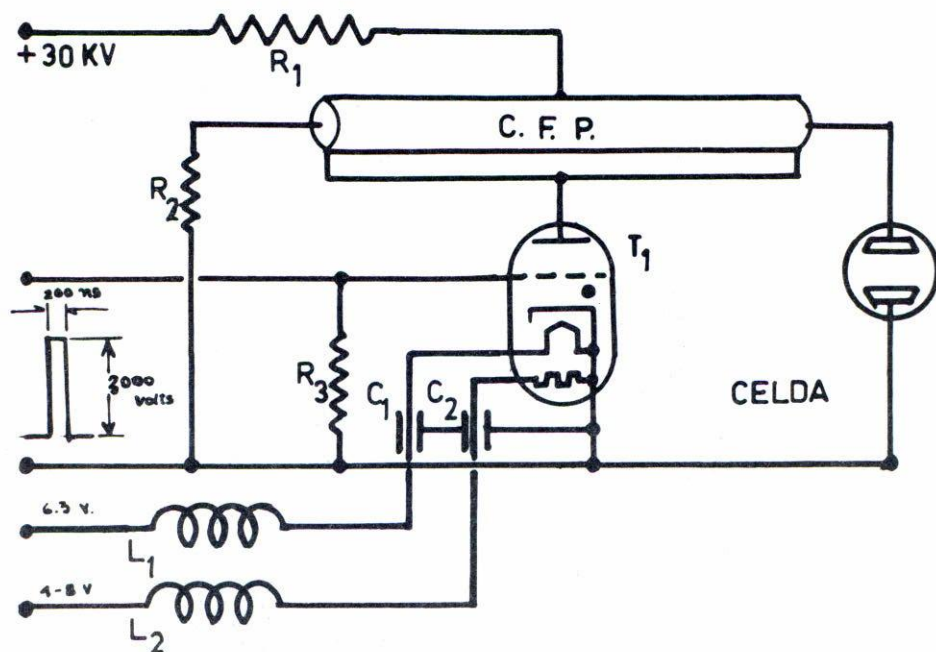


Figura 3. Circuito productor del pulso para la apertura de la celda de Kerr

$R_1 = 2-6 \text{ M}\Omega$; $R_2 = Z_0$ (impedancia característica del cable) = 50Ω ;
 $R_3 = 50 \Omega$; $C_1 = C_2 = 0.02 \mu\text{F}$. 40A; $L_1 = L_2 = 5 \mu\text{H}$; $T_1 = \text{KU-27}$;
 C.F.P. (circuito formador de pulsos).

En este circuito el elemento que forma el pulso es la línea coaxial C.F.P. Al aplicarse un pulso positivo en la rejilla del thyatron aparece en el extremo de la línea conectado a la celda un potencial que se describe por la función siguiente:

$$v(o, t) = -V_0 \left[1 - \frac{R_0}{L_c \Omega} \exp\left(-\frac{Rt}{2L_c}\right) \text{sen } \Omega t \right] + V_0 u(t - \tau) \left[1 - \frac{R_0}{L_c \Omega} \exp\left(-\frac{R(t - \tau)}{2L_c}\right) \text{sen } \Omega(t - \tau) \right]$$

(4)

que determina una corriente dada por:

$$i(o, t) = \frac{V_0}{L_c \Omega} \exp\left(-\frac{Rt}{2L_c}\right) \text{sen } \Omega t - u(t - \tau) \frac{V_0}{L_c \Omega} \exp\left(-\frac{R(t - \tau)}{2L_c}\right) \text{sen } \Omega(t - \tau)$$

(5)

En estas expresiones:

$$\Omega = \sqrt{\frac{1}{L_c C_c} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

$$R = R_0 + R_c$$

$$\tau = l\sqrt{LC}$$

l Longitud del cable coaxial en metros

L Inductancia por unidad de longitud del cable en Hy/m.

C Capacitancia por unidad de longitud del cable en F/m.

Si las inductancias de la celda y terminales son suficientemente pequeñas de manera que se cumpla $\tau \gg \frac{2L_c}{R}$, entonces la ecuación (4) representa un pulso de voltaje rectangular con crecimiento y caída oscilatorios amortiguados exponen-

cialmente o exponenciales dependiendo de los valores específicos de los parámetros. La amplitud aproximada del pulso es V_0 y el tiempo de duración es $\tau = l\sqrt{LC}$.

Cuando la resistencia de carga R_0 es diferente de la impedancia característica de la línea⁶, una parte de la energía almacenada queda en ésta, sin transferirse a la carga. Esta energía al propagarse sucesivamente por la línea, da lugar a la formación de pulsos de amplitud decreciente. Si la amplitud de esos pulsos secundarios es 40% del potencial de apertura máxima, entonces, de acuerdo con la ecuación (3), la transmisión será apenas 5% de la máxima teórica. Por esta razón el obturador no es particularmente sensible a la forma del pulso. Es decir que se pueden permitir excesos y defectos por desacoplamiento en la forma del pulso, siempre que éstos no excedan $0.4 V_a$.

DETALLES PRINCIPALES DE CONSTRUCCION

Como el tubo interruptor (KU-27) se trabaja a un potencial mayor que el nominal (30kV en vez de 16kV), se producen arcos desde la terminal del ánodo sobre la superficie de vidrio de la envoltura del tubo y hacia electrodos internos. Para eliminar esos arcos fué necesario desmontar la terminal del ánodo e instalar una pieza de teflón que ajustara perfectamente con el vidrio que envuelve a la terminal del cátodo; también se construyeron dos piezas de lucita para cubrir al tubo. Los detalles se muestran en la Fig. 5.

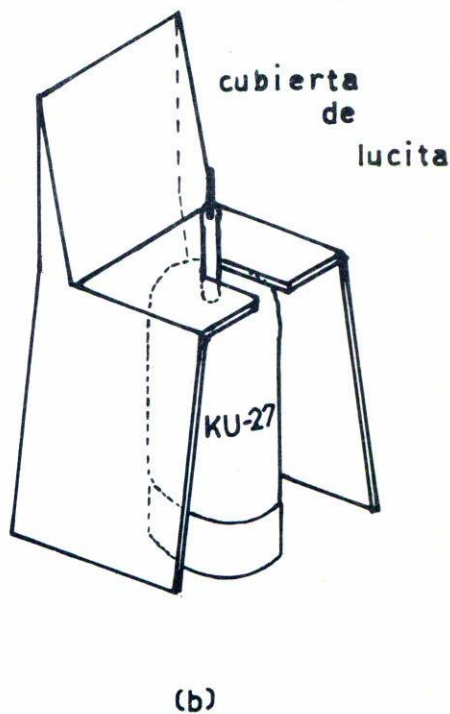
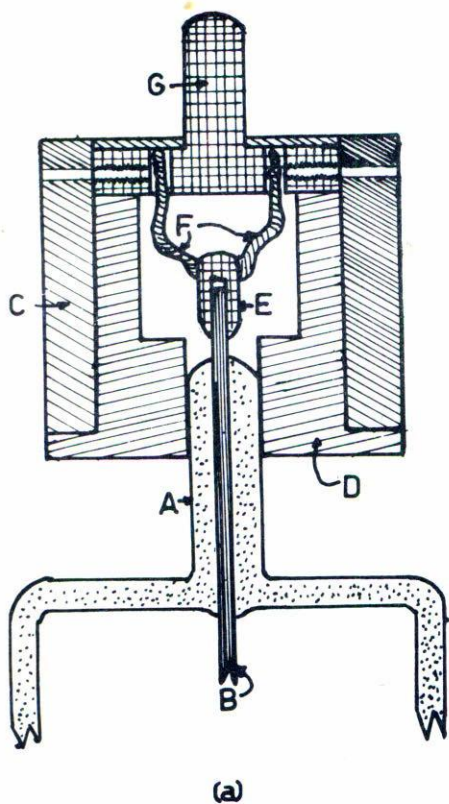


Figura 5. Detalles del dispositivo para eliminar arcos indeseables entre el ánodo del KU-27 y varios puntos en torno.

- a) Corte longitudinal de la pieza colocada en la terminal del ánodo.
 (A) ampolla de vidrio del KU-27, (B) terminal del ánodo, (C) y (D) teflón, (E) conector, (F) conductor elástico, (G) terminal exterior.
- b) Protección adicional de lucita.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

La forma de onda de los pulsos generados por el circuito que controla la celda se muestran en las Figs. 6a y 6b.

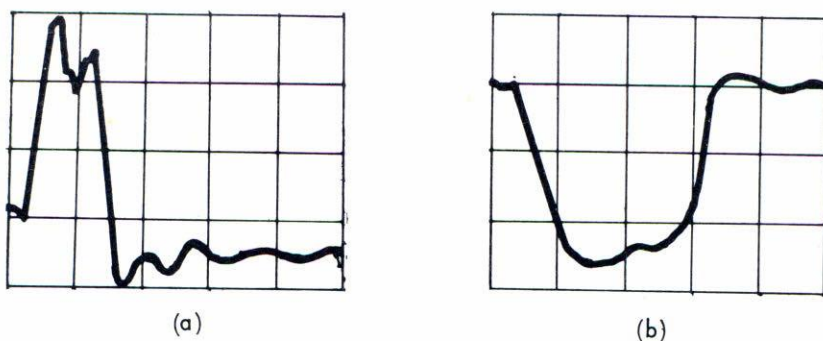


Figura 6. (a) Pulso de salida del excitador de alto nivel. Escala horizontal 200ns/división.

(b) Pulso aplicado a la celda. Escala horizontal 100ns/división.

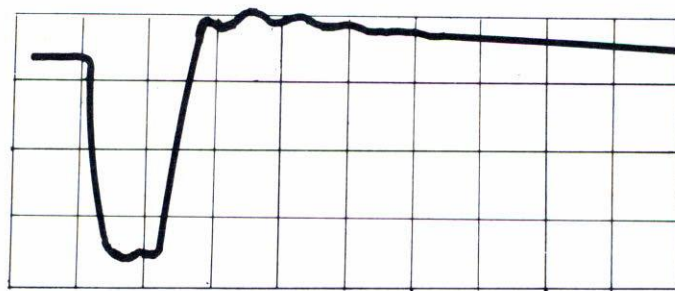


Figura 7. Pulso de luz transmitida. 100ns/división.

La Fig. 7 muestra la transmisión contra tiempo. Debe notarse que sólo tienen significado las porciones negativas de la forma del pulso de luz transmitida, los excesos positivos son producidos por el sistema de medición.

El nitrobenzeno usado es el que se obtiene comercialmente y no se le purificó especialmente. La resistencia eléctrica medida entre electrodos es del orden de $1\text{ M}\Omega$, que es muy baja comparada con la reportada como necesaria por algunos autores, que es del orden de $10^{10}\Omega$. Sin embargo el efecto Kerr ocurre en aparien-

cia sin depender de la pureza del nitrobenceno como lo muestran las Figs. 7 y 8. Debe considerarse por tanto que el requisito de una muy alta resistencia en el nitrobenceno es de importancia en los casos en que el potencial de apertura se aplica durante tiempos largos a la celda. Esta observación coincide con la de Zarem y Marshall⁴.

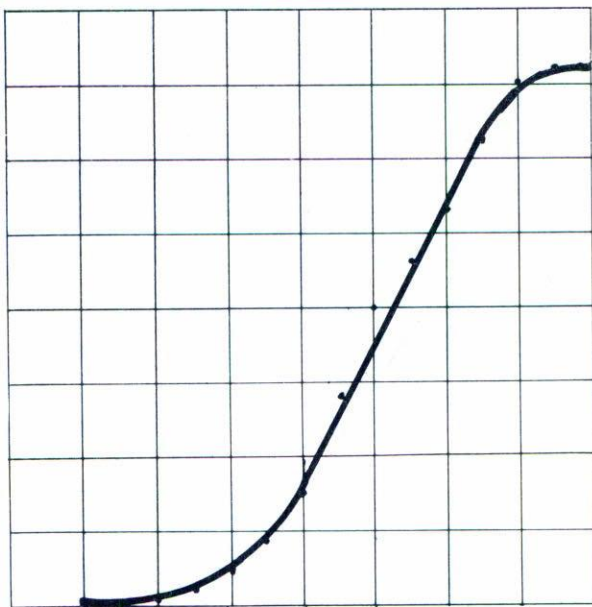


Figura 8. Variación de luz transmitida en función del potencial entre electrodos. Escala vertical: intensidad luminosa transmitida (unidades arbitrarias). Escala horizontal: 4 kV/división.

La Fig. 8 presenta la variación medida de luz transmitida en función del potencial entre electrodos. Esta curva coincide con otras publicadas^{4, 7} y con la predicción de la ecuación (1).

Como ejemplo de los resultados de la operación del obturador descrito se muestra la Fig. 9 que es la fotografía de una descarga eléctrica producida con un banco de condensadores de 3 kJ aproximadamente cargado a 15 kV, entre dos electrodos metálicos, a 0.020 Torr de presión en aire y en cámara de paredes dieléctri-

cas. La corriente pico es del orden de 70kA, la descarga es oscilatoria amortiguada con período de $40 \mu s$, el tiempo de apertura es 300ns y el retardo a partir del momento en que la descarga se inició es $34 \mu s$.



Figura 9. Fotografía de una descarga eléctrica. Tiempo de apertura 300ns.

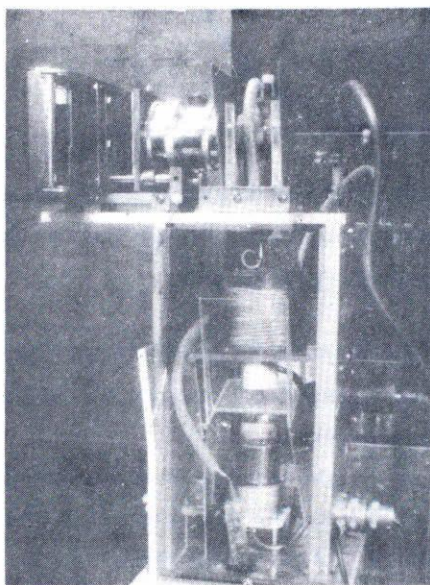


Figura 10. Arreglo experimental final del obturador de Kerr.

La Fig. 10 presenta el arreglo experimental final del obturador incluyendo celda de Kerr, cámara fotográfica y generador del pulso de apertura.

El sistema ha operado ya varios centenares de veces, sin mostrar fatiga.

Una limitación importante que se considera para obtener tiempos largos de apertura, es la longitud necesaria de cable coaxial. El cable usado RG-58/U permite obtener tiempos de apertura de aproximadamente 5 ns/m; por tanto para tiempos del orden de 500 ns se requieren longitudes de 100 m. Desde un punto de vista práctico el valor indicado se puede considerar como un límite superior para el tiempo de apertura obtenido usando líneas coaxiales, ya que la línea necesaria complica el diseño mecánico. A partir de tal valor se pueden usar líneas artificiales construidas con elementos concentrados hasta valores en que los dispositivos mecánicos resuelven el problema.

REFERENCIAS

1. A. Folkierski, *Nuclear Instruments & Methods* **4** (1959) 346.
2. W.C. Goss, *J. S.M.P.T.E.*, **69** (1960) 889.
3. S.M. Hauser and H. Quan; *Electronics* **34** No. 33, (1961).
4. A.M. Zarem, F.R. Marshall; *Rev.Sci.Inst.* **27** No. 6, (1950).
5. A. Karolus, Actes du Deuxieme Congres International de Photographie et Cinematographie Ultra-Rapides, Paris 1956.
6. G.N. Glasoe y J.V. Lebacqz, Pulse Generators, McGraw Hill, 1948.
7. F.G. Dunnington, *Phys.Rev.* **38** (1931).