

ESTUDIOS PARA EL DISEÑO DE UNA LLAVE DE ALTA TENSIÓN TIPO PSEUDO SPARK GAP OPERANDO A BAJA PRESIÓN DISPARADA POR UN HAZ DE ELECTRONES

J. Niedbalski

Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones CEILAP (CITEFA-CONICET)
San Juan Bautista de La Salle 4397 – (B1603ALO) Villa Martelli, Buenos Aires.
e-mail: jniels@infovia.com.ar

Se estudia la factibilidad de empleo de un haz de electrones con relativamente alta densidad de corriente asociada ($J_b \approx 140 \text{ A/cm}^2$) y componentes de mediana energía ($\sim 50 \text{ keV}$), para inducir la transferencia de carga acumulada en capacitores a través del espaciado ($\approx 15 \text{ mm}$) delimitado por una grilla de 60 % de transparencia óptica y un electrodo de campo uniforme. La configuración grilla-electrodo en un medio gaseoso a baja presión (rama izquierda de la curva de Paschen) actúa como una llave de corte de alta tensión. El mecanismo de cierre se basa en la creación de plasma del material del electrodo (Cu), por interacción directa del haz de electrones que es inyectado a través de la grilla. Evidencias de este mecanismo se obtienen de los registros de las evoluciones temporales de la corriente de descarga y de la radiación visible emitida durante el proceso de conmutación de capacitores de 2 y 40 nF en condición subamortiguada.

The feasibility of employing an electron beam with relatively high current density ($J_b \approx 140 \text{ A/cm}^2$) and medium energy components ($\sim 50 \text{ keV}$) to induce the transferring of charge stored in capacitors through the space ($\approx 15 \text{ mm}$) delimited by a grid of 60 % in optical transparency and a uniform field electrode is studied. The grid-electrode configuration at a low-pressure gaseous medium (left branch of the Paschen curve) acting as a DC high-voltage hold-off switch. The closure mechanism is based on the electrode material (Cu) plasma creation by direct interaction with the electron beam injected through the grid. Evidences of this mechanism are obtained from the time evolution of the discharge currents and visible radiation emitted during the switching process of 2 and 40 nF capacitors in underdamped condition.

I. INTRODUCCIÓN

Una de las mayores dificultades que se presentan en la implementación de circuitos generadores de pulsos de alta tensión y corriente, entre ellos los corrientemente usados para aplicaciones de bombeo láser, está directamente vinculada con sus componentes, particularmente llaves de conmutación. Estas tienen como finalidad específica transferir rápidamente carga eléctrica acumulada inicialmente a alto potencial en forma estática o dinámica en elementos capacitivos (bancos de capacitores o líneas formadoras de pulsos) a medios resistivos típicamente no lineales constituidos por mezclas gaseosas. Hay una variedad de tipos de llaves desarrolladas para ese fin, cada una con determinadas ventajas en su característica de funcionamiento para ser adaptada a los requerimientos de prestación en un dado circuito. Entre las más ampliamente difundidas en tecnología láser están comprendidas las gaseosas a través de diferentes versiones que operan a relativamente alta presión conocidas como "spark-gap" y "rail-gap",¹⁻⁴ con aplicación generalmente limitada a experiencias de laboratorio, y las que operan a baja presión como las comercialmente disponibles "thyratrones" (en sus diversas variantes constructivas) basadas en emisión termoiónica,^{5,6} junto con las configuradas con electrodos cilíndricos huecos denominadas "pseudo spark-gap".^{7,8}

Los métodos concebidos para iniciar el proceso de cierre (o disparo) en estas dos últimas, involucran la rápida aplicación de un pulso de alta tensión a un tercer electrodo o grilla de control para generar un significativo

gradiente en el campo eléctrico previamente establecido en la región interelectródica (caso de las thyratrones) y una débil preionización en el interior de uno de los electrodos huecos (cátodo) generada o bien por una descarga de baja tensión o por un pulso óptico de alta intensidad provisto por una lámpara "flash". Al presente, los esfuerzos de innovación en estas llaves están básicamente orientados hacia el desarrollo de nuevos métodos de disparo o variantes de los existentes, junto con diseños estructurales de baja inductancia para mejorar determinados requerimientos de prestación entre los que principalmente se incluyen: transferencia de corriente con muy altos valores pico, disminución del tiempo de trepada de esa corriente y reducción de la tasa de erosión de los electrodos de descarga para acrecentar su vida efectiva.

Este trabajo tiene como objetivo básico demostrar la aplicabilidad de un haz de electrones con alta densidad de corriente asociada y componentes de mediana energía, como un nuevo método para inducir a través de intensas descargas difusas (pseudo spark) a baja presión ($\sim 10^{-3}$ Torr), el cierre del espacio delimitado por un par de electrodos de campo uniforme que opera como una llave de corte de alta tensión.

II. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

La Fig. 1 muestra la sección transversal a lo largo de su eje mayor del dispositivo experimental empleado para este estudio. El diodo que contiene al electrodo con geometría puntiforme (lado derecho de la figura) constituye

la fuente pulsada de electrones. Este opera en régimen de emisión explosiva alimentado por un pequeño generador de pulsos de alta tensión (tipo Marx) de 250 pF de capacidad equivalente y 60 kV de tensión máxima de salida. Su característica de funcionamiento y principales resultados paramétricos obtenidos fueron previamente reportados.⁹

El diodo proporciona haces de electrones con sección transversal de aproximadamente 0.12 cm², una densidad de corriente de ~ 140 A/cm² y componentes de energía máxima de ~ 50 keV. La región delimitada por la grilla y el electrodo de campo uniforme (lado izquierdo de la figura) representa básicamente la parte del dispositivo que

experimentalmente que V_{bd} está muy por encima de 10 kV.

III. CIRCUITO DE DESCARGA

En la Fig. 3 se muestra esquemáticamente el circuito de descarga construido para las pruebas de conmutación. Se emplearon en experiencias separadas capacitores (C_o) de 2 y 40 nF con tensiones de carga máxima de 20 y 40 kV, respectivamente. La elección de valores muy similares de capacidad tuvo como propósito establecer un contraste significativo tanto en las evoluciones temporales

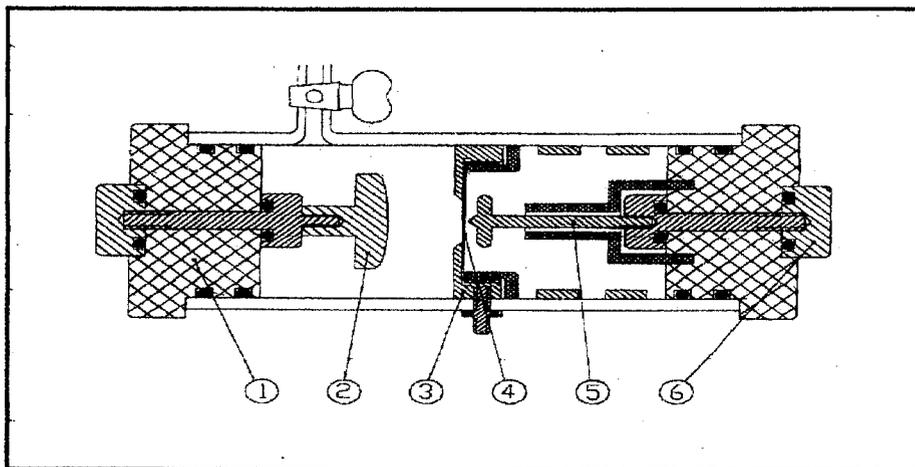


Fig. 1 Sección transversal a lo largo del eje mayor del arreglo usado como llave de conmutación. Lado derecho: diodo generador de electrones. Lado izquierdo: región de corte de alta tensión. (1) tapa sello de presión, (2) electrodo de alta tensión (Cu), (3) pieza soporte de grilla con conexión a tierra, (4) grilla, (5) cátodo puntiforme, (6) terminal de conexión a alta tensión.

es usado para el corte de alta tensión. La grilla que separa ambas regiones actúa como ánodo del diodo y cátodo de la llave; es de acero inoxidable, presenta una transparencia óptica de ~ 60% y es incorporada a una pieza soporte de Al convenientemente maquinada (conectada a potencial de tierra) que contiene una apertura circular de 16 mm de diámetro para posibilitar la inyección del haz. El electrodo de campo uniforme fue construido de Cu con sección de descarga cilíndrica de 35 mm de diámetro y es fijado a una distancia $d \approx 15$ mm con respecto a la grilla. El entero dispositivo es evacuado hasta una presión residual dinámica de aire $p \approx 10^{-3}$ Torr por medio de un sistema convencional de bombas mecánica y difusora.

Bajo las condiciones de presión y separación interelectródica correspondiente a la presente condición operativa de la llave ($pd = 1.5 \cdot 10^{-3}$ Torr.cm) su punto de trabajo se encuentra localizado en la rama izquierda (respecto del mínimo) de la curva de Paschen dada por la tensión de ruptura espontánea V_{bd} de la brecha interelectródica en función del producto pd . Como ilustración en la Fig. 2 se muestran curvas características para hidrógeno y aire dentro del rango 10^{-1} - 10^2 cm.Torr. La extrapolación lineal de la curva correspondiente a aire para el parámetro pd dado, establece un valor de $V_{bd} \gg 50$ kV. Por medio de una punta de alta tensión (Tektronix P6015) se confirmó

como en las amplitudes de las corrientes de descarga, siendo éstas registradas por medio de una bobina de Rogowski (BR) instalada con adecuada aislación eléctrica en el conexionado del electrodo de alta tensión. Para satisfacer las diferentes condiciones de amortiguamiento del circuito, se usaron como elementos de "carga" disipativos resistencias electrofíticas de CuSO_4 (Re) y la llave S para su cortocircuito.

IV. CARACTERÍSTICA OPERATIVA Y RESULTADOS

Operativamente, el procedimiento para un experimento de conmutación se realiza cargando C_o a una tensión de trabajo predeterminada V_o (típicamente $V_o \ll V_{bd}$) y descargándolo subsecuentemente mediante la inyección del haz de electrones en la región interelectródica de la llave a través de la grilla. Empleando el capacitor de 2 nF, se determinó que la magnitud de V_o aplicada al ánodo influencia considerablemente la amplitud (I_m) de la corriente asociada al haz de electrones inducida en el mismo. En efecto en el rango de tensiones V_o crecientes hasta ~ 2.5 kV (con Re cortocircuitada), I_m se incrementa a partir de 500 V hasta alcanzar un máximo de ~ 65 A, tal como se muestra en la Fig. 4. Los datos del gráfico son

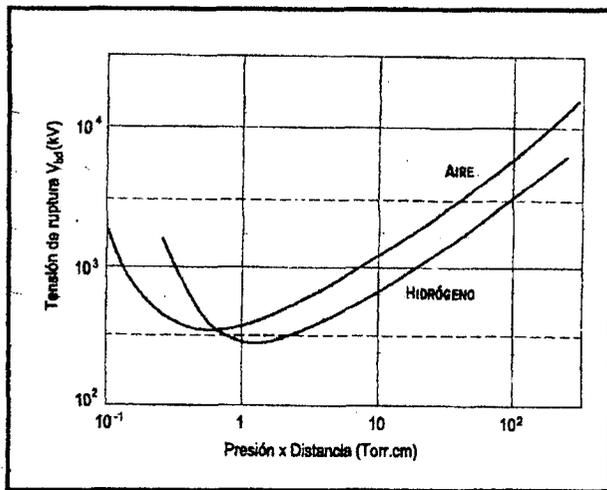


Fig. 2 Curvas de Paschen: tensión de ruptura espontánea V_{bd} en función de $p*d$ (10^{-1} – 10^2 Torr. cm) para aire e hidrógeno.

razonablemente ajustados por la traza continua derivada de la expresión polinómica: $I_m(V_o) = -2.76V_o^4 + 4.8V_o^3 + 16.5V_o^2 - 9.09V_o + 17.7$.

En la Fig. 5 se ilustra el comportamiento temporal de esa corriente.

niendo un medio gaseoso a muy baja presión (10^{-4} Torr) sin campo eléctrico externo aplicado fue determinado en ~ 200 mm.¹⁰

La fase de inicio del desarrollo de la descarga oscilatoria de C_o (disparo de la llave), puede ser interpretada fenomenológicamente como resultado de la vaporización del material del ánodo por el haz de electrones: una vez irradiado el ánodo, el intenso potencial existente en su vecindad, produce una rápida separación de cargas (ionización) del vapor metálico formado, dando origen a una carga espacial neta positiva cuyos iones componentes son fuertemente acelerados en forma colectiva hacia la región de la grilla hasta colapsar con la misma. Este plasma constituye el medio conductor que reduce en forma significativa la extremadamente alta impedancia inicial de la región grilla-electrodo permitiendo su cierre. De ahí en adelante, el proceso de conducción durante los sucesivos ciclos, es mantenido por el plasma producido vía calentamiento Joule y por emisión secundaria de electrones en la región de la grilla hasta su extinción (descarga total del capacitor). El aspecto de la descarga, particularmente cuando el capacitor de 40 nF es conmutado, presenta un carácter difuso con superposición de numerosos filamentos componentes los cuales se apre-

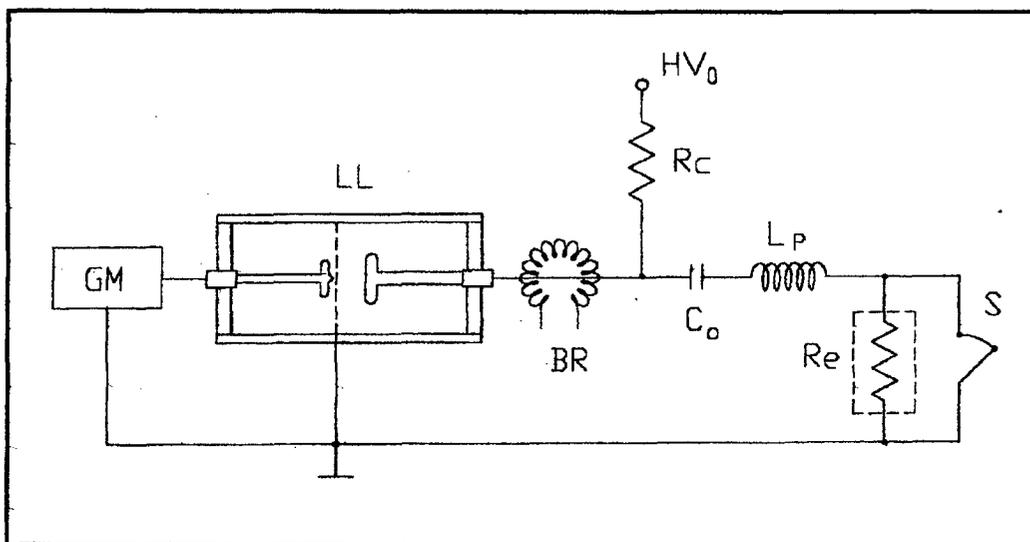


Fig. 3 Esquema del circuito de descarga empleado para las pruebas de conmutación de C_o . GM: generador de Marx; LL: llave; BR: bobina de Rogowski; $R_c = 100$ M Ω ; $C_o = 2$ nF ó 40 nF; L_p : inductancia parásita; R_e : resistor electrolítico; S: llave de cortocircuito de R_e .

Para tensiones $V_o > 2.5$ kV se observa una modificación en su forma de onda que aparece ahora como la de una típica descarga oscilatoria subamortiguada $L_p C_o Z_o$ como se muestra en Fig. 6, donde L_p y $Z_o = (L_p/C_o)^{1/2}$ son la inductancia parásita e impedancia característica del circuito, respectivamente, en forma concomitante con la formación de un foco luminoso intenso (resultante de la interacción del haz de electrones) localizado en una pequeña área de la superficie del ánodo. El rango de propagación de un intenso haz de electrones relativista con sección transversal cilíndrica en una región conte-

cian como regiones luminosas discretas (posiblemente con altas temperaturas) distribuidas sobre un área considerable de la superficie del ánodo. Producto del bombardeo iónico inicial y después de varias decenas de descargas, una amplia región de la grilla aparece ligeramente erosionada junto con un tenue depósito de átomos de metal del ánodo alrededor de la misma.

Como una segunda forma de evidenciar la existencia del plasma durante el periodo de conducción de la llave, se registró la radiación visible emitida por éste desde una pequeña región del espaciado grilla-electrodo. Se empleó

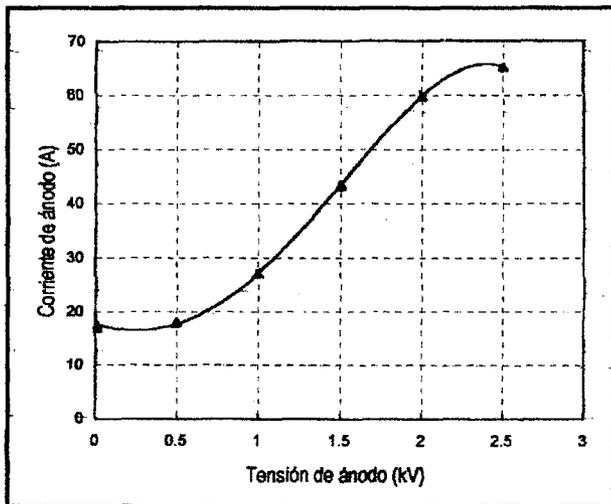


Fig. 4 Amplitud de corriente del haz de electrones inducida en el ánodo en función de la tensión aplicada (V_0) en el rango 12V- 2.5 kV con $R_e = 0$.

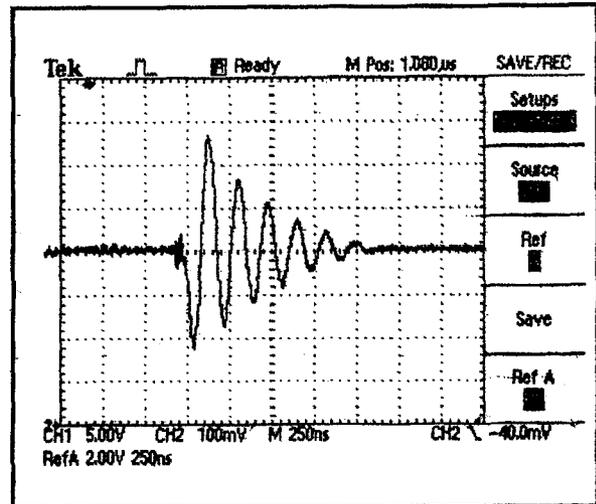


Fig. 6 Evolución de la corriente de descarga obtenida conmutando $C_0 = 2\text{nF}$ con $R_e = 0$ para $V_0 = 3\text{ kV}$. Horizontal: 250 ns/div; Vertical: 74 A/div.

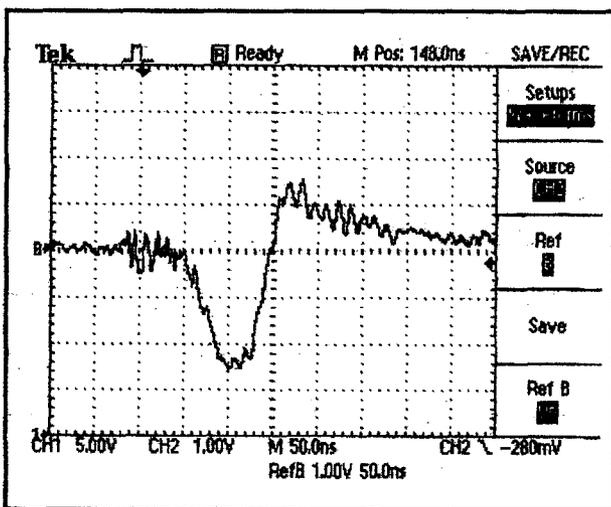


Fig. 5 Evolución de la corriente inducida en el ánodo para una tensión $V_0 = 2.5\text{ kV}$. Horizontal: 50 ns/div; vertical: 29.6 A/div.

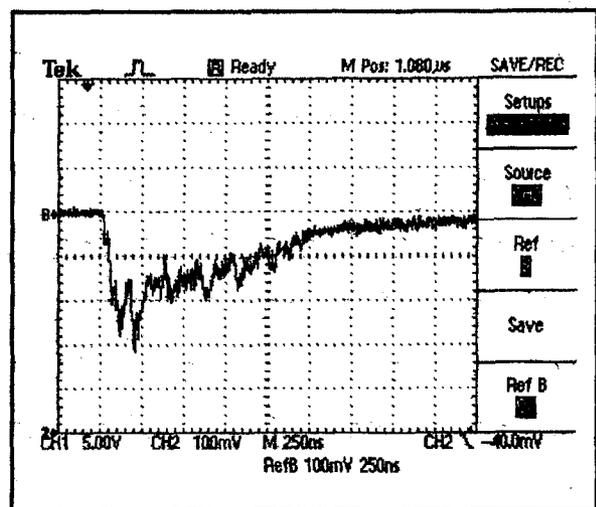


Fig. 7 Evolución temporal del pulso óptico emitido desde la región grilla-ánodo durante la conmutación de $C_0 = 2\text{nF}$ con $R_e = 0$ para $V_0 = 3\text{ kV}$. Horizontal: 250 ns/div; Vertical: UA.

una guía de luz constituida por un conjunto de fibras ópticas de 1.5 metros de longitud en cuyos extremos tiene incorporadas pequeñas lentes convergentes para maximizar la radiación colectada en las caras de las fibras y la posteriormente transportada. Uno de esos extremos es fijado sobre la pared de la celda (vidrio) de la llave en la mitad de su longitud, mientras que el otro es adaptado en la proximidad de la superficie sensible de un fotodiodo rápido adecuadamente polarizado. La Fig. 7 ilustra el comportamiento temporal de la emisión registrada durante la descarga del capacitor de 2 nF. De su comparación con el correspondiente oscilograma de corriente (Fig. 6), puede observarse como las amplitudes de ambas van contemporáneamente decreciendo hasta anularse en aproximadamente $1\mu\text{s}$. Una correspondencia similar entre ambas señales fue verificada conmutando el capacitor de 40 nF.

En las Figs. 8 y 9 se muestran los registros de corriente

y pulso óptico, respectivamente, para una tensión de carga $V_0 = 3\text{ kV}$ con R_e cortocircuitada.

El circuito fue también operado en condición sobreamortiguada ($R_e > 2(L_p/C_0)^{1/2}$) que se corresponde con valores de $R_e > 13.5\ \Omega$ para $C_0 = 2\text{ nF}$ y $R_e > 3.78\ \Omega$ para $C_0 = 40\text{ nF}$. De esta forma, la polaridad de los electrodos de la llave está bien definida y la transferencia de carga a través de la misma es unidireccional. El aspecto que presenta la descarga de cierre difiere de esa observada en condición subamortiguada, desarrollándose ahora como una intensa columna que cubre una pequeña área de ambos electrodos. Esta condición operativa del circuito constituye la manera real bajo la cual la llave debe usualmente funcionar.

En general, la cantidad de material que requiere ser ablacionada por el haz de electrones debe garantizar una suficiente producción de vapor y subsecuente densidad de

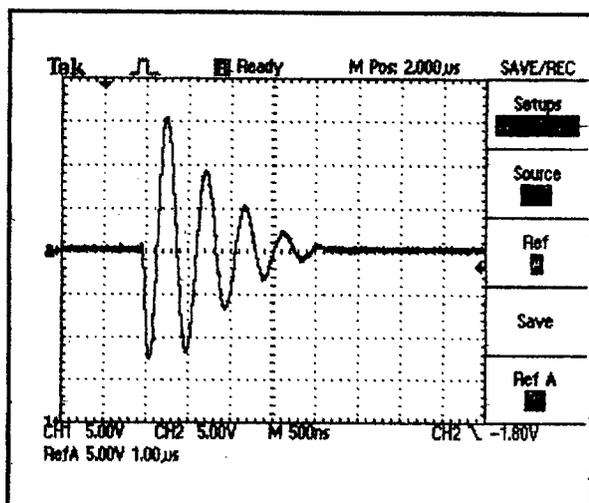


Fig. 8 Evolución de la corriente de descarga obtenida conmutando $C_0 = 40$ nF con $R_e = 0$ para $V_0 = 3$ kV.
Horizontal: $1 \mu\text{s}/\text{div}$; vertical: 260 A/div.

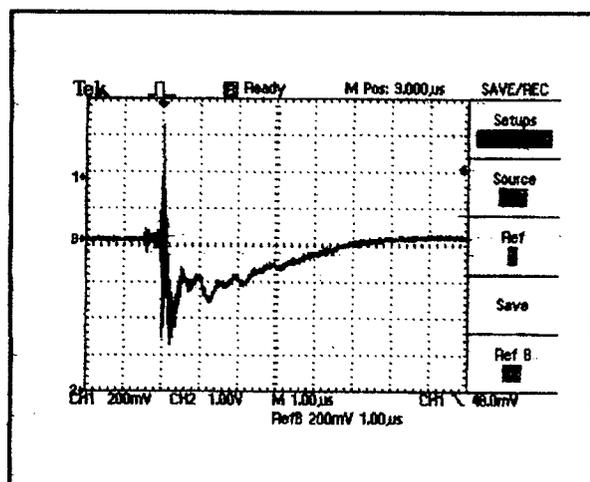


Fig. 9 Evolución temporal del pulso óptico emitido desde la región grilla-ánodo durante la conmutación de $C_0 = 40$ nF con $R_e = 0$ para $V_0 = 3$ kV.
Horizontal: $1 \mu\text{s}/\text{div}$; vertical: UA

iones como para sustentar el transporte total de carga inicialmente acumulado en C_0 . Note que para este fin y de ser necesario, la densidad de corriente y energía del haz de electrones podrían ser arbitrariamente modificados, variando la capacidad y tensión de salida, respectivamente, del generador de Marx que alimenta al diodo. Con los actuales parámetros del haz ese requerimiento fue ampliamente satisfecho en la conmutación del capacitor de mayor valor hasta $V_0 = 6$ kV y el de menor hasta 10 kV; ambas tensiones fueron restringidas por la limitación de la fuente de alta tensión empleada para la carga de los mismos y principalmente por las dimensiones físicas y fragilidad del dispositivo usado en estas experiencias.

V. CONCLUSIONES

Los resultados presentados muestran la efectividad de un intenso haz de electrones para inducir el cierre a baja

presión del espacio limitado por dos electrodos que opera como una llave de corte de alta tensión. Dicho cierre tiene lugar a través de una intensa descarga difusa (pseudo spark) que es sustentada por el plasma creado por interacción de ese haz con uno de los electrodos. Este mecanismo fue inferido de las determinaciones de las evoluciones temporales de las corrientes de descarga y radiación visible emitida durante el proceso de conmutación de capacitores, operando el circuito en condición de subamortiguamiento, junto con la verificación de transferencia de átomos de material desde el ánodo a la grilla, observado como un tenue depósito sobre la misma.

Una llave basada en este método de disparo y diseñada apropiadamente en lo que hace a sus dimensiones físicas, robustez mecánica y aislación eléctrica para evitar descargas superficiales vía pared, presentaría como características más importantes:

- 1.- el corte de muy altas tensiones de trabajo (V_0).
- 2.- la capacidad de ser cerrada consistentemente en prácticamente todo el rango de tensión por debajo de su tensión de ruptura espontánea ($V_0 / V_{bd} \ll 1$).
- 3.- una relativa simplicidad constructiva comparada con las actuales que operan a baja presión.
- 4.- la posibilidad de extender la sección transversal de la descarga de cierre, por ejemplo, configurando el cátodo del diodo emisor de electrones con múltiples puntas cónicas adyacentes distribuidas sobre un área plana de algunos centímetros cuadrados. Como consecuencia de esto, tanto la inductancia como la resistencia asociada a la propia descarga pueden ser minimizadas proporcionando un funcionamiento con menor disipación de energía interna, transferencias de corriente con altos valores pico y una baja tasa de erosión de los electrodos.

Finalmente, el reemplazo de aire por hidrógeno como gas de trabajo, permitiría incrementar la presión residual al menos en un orden de magnitud para similares magnitudes de corte de tensión, de acuerdo con lo que surge de la curva de Paschen (Fig. 2), requiriendo para ello el empleo de un sistema de vacío constituido por una bomba mecánica (sin difusora) de reducidas dimensiones.

REFERENCIAS

- [1] R.Taylor and K.Leopold, Rev. Sci. Instrum. **55** (1), 52 (1984).
- [2] N.Seddon and P.Dickinson, Rev. Sci. Instrum. **58** (6), 804 (1987)
- [3] J.Niedbalski, J. Phys. D: Appl. Phys. **29**, 789 (1996).
- [4] J.Niedbalski, Rev.Sci. Instrum. **69** (3), (1998).
- [5] D.Basting et.al., Laser and Optoelektronik **2**, 128 (1984).
- [6] S.Friedman and R.Caristi, Laser Focus Electro-Optics, **23** (7) 70 (1987).
- [7] G. Mechtshheimer et.al, J. Phys. E: Sci. Instrum.. **19**, 466 (1986).
- [8] G. Mechtshheimer and R. Kohler, J. Phys. E: Sci. Instrum. **20**, 270 (1987).
- [9] J.Niedbalski, Anales AFA Vol.11, 145 (1999).
- [10] A.Luches, V. Nassisi and A. Perrone, J. Appl. Phys. **50** (4), 2502 (1979).