

Mediciones de rompimiento electrostático en separaciones micrométricas

Electrostatic Breakdown Measurements in Micro Gaps

7
técnica

Recibido 21 de julio de 2008, modificado 17 de marzo de 2009, aprobado 27 de marzo de 2009.

Juan Sebastián Rodríguez

Ingeniero Eléctrico y Electrónico, Estudiante de Maestría en Ingeniería Electrónica y Computadores, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.
se-rodri@uniandes.edu.co ✉

Sebastián Bonilla

Ingeniero Eléctrico y Electrónico, Estudiante de Maestría en Ingeniería Electrónica y Computadores, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.
ru-bonil@uniandes.edu.co ✉

Alba Ávila

Ph.D. en Física. Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia
a-avila@uniandes.edu.co ✉

PALABRAS CLAVES

Curva de Paschen, MEMS, rompimiento electrostático, voltaje de rompimiento.

KEY WORDS

Breakdown voltage, MEMS, Paschen curve.

RESUMEN

La continua miniaturización de dispositivos electrónicos y electro-mecánicos ha permitido el estudio de efectos no visibles a macroescalas, como es el caso del comportamiento de electrodos separados a microescala. Se presenta aquí el comportamiento de electrodos de aluminio a presión atmosférica para un rango de separaciones de $1 \mu\text{m}$ a $22 \mu\text{m}$. Convencionalmente, el comportamiento de electrodos se describe a partir de la curva de Paschen. Los resultados demuestran que, a separaciones menores de $4 \mu\text{m}$, el voltaje de rompimiento en los electrodos decae drásticamente y no presenta un mínimo como lo predice la curva de Paschen. Esta modificación establece condiciones críticas de operación en dispositivos basados en electrodos con separaciones a microescalas [1, 2].

ABSTRACT

The continuous miniaturization of electronic and electromechanical devices has allowed the study of non-visible effects on macroscales, as it is the case of the behavior of microgap separated electrodes. The behavior of aluminum electrodes at atmospheric pressure appears here for a rank of separations of $1 \mu\text{m}$ to $22 \mu\text{m}$. The Paschen curve is conventionally used to describe the behavior of electrodes. The results demonstrate that at separations smaller than $4 \mu\text{m}$ the breakdown voltage in the electrodes decays dramatically and it does not present a minimum as predicts the Paschen curve. This modification establishes critical conditions of operation in devices based on electrodes with microgap separations [1, 2].

INTRODUCCIÓN

La integración ha sido la clave de la tecnología actual, no solo en microelectrónica sino también en otros campos. Recientemente, aplicaciones en comunicaciones han proyectado el uso de capacitores variables para operar algunos de sus dispositivos tales como: filtros, osciladores, antenas reconfigurables, entre otros [3]. La miniaturización promete tener una mayor densidad de dispositivos por chip y un mayor rango de sintonización al alcanzar separaciones más pequeñas sin que el voltaje de rompimiento se incremente proporcionalmente [4].

Entender el comportamiento de capacitores o electrodos separados a microescala es un paso crítico para el diseño de dispositivos basados en actuación capacitiva. La disrupción del dieléctrico es un fenómeno que comprende un conjunto de procesos transitorios, los cuales han sido estudiados por más de un siglo y todavía continúan siendo pobremente entendidos [5]. Los primeros estudios en esta dirección fueron realizados por el científico Friedrich Paschen en 1889 [6], quien planteó una ley que describía el comportamiento electrostático de electrodos bajo condiciones dadas de presión y distancia. Un trabajo posterior determinó que la ley de Paschen también depende de los electrones secundarios emitidos desde el cátodo cuando son impactados por iones positivos [7]. Estos electrones promueven la aceleración del proceso de rompimiento y dependen tanto de las propiedades del gas entre los electrodos como del material del electrodo [8].

La chispa generada por el rompimiento del aire ocurre cuando la fuerza del campo eléctrico se vuelve lo suficientemente intensa como para acelerar los electrones a una velocidad que los hace capaces de ionizar las moléculas del aire. Los iones acelerados en este campo liberan electrones de los electrodos mediante colisión, en donde el rompimiento ocurre cuando este proceso se vuelve sostenible. Si la corriente es limitada, la descarga es un resplandor; de lo contrario, se forma un arco eléctrico. El voltaje al cual ocurre el rompimiento depende de la forma y del material de

los electrodos, de la presión del gas y de la distancia de separación entre los electrodos. La dependencia más importante es con la presión del gas y la distancia de separación de los electrodos. A presiones bajas, el rompimiento ocurre a mayores distancias.

La curva de Paschen está dada por la siguiente ecuación [9]:

$$V_{rd} = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln(A \cdot p \cdot d) - \ln\left(\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right)}$$

Donde V_{rd} es el voltaje de rompimiento del dieléctrico, p es la presión, d es la distancia, A y B son constantes que dependen de la composición del gas, para aire: $A=15 \text{ cm}^{-1} \text{ Torr}^{-1}$ y $B=365 \text{ Vcm}^{-1} \text{ Torr}^{-1}$ [10]. Finalmente, es el coeficiente de emisión de electrones secundarios, el cual está dado por [7]:

$$\gamma = K e^{-D/E}$$

Donde K y D son constantes dependientes del material y del gas entre los electrodos, y E es el campo eléctrico. La determinación de la constante K puede ser bastante difícil, especialmente si hay complicaciones para la adhesión de los electrones, ionización por metastables, etc. (para más detalles ver [11, 12]). En general, la constante K puede ser determinada de la relación de la densidad de corriente de emisión de campo con la corriente de iones positivos sobre el cátodo [7]. Para aire y electrodos de aluminio, determinamos un valor $\gamma=10^{-2}$ usando la información de [13] y [7] respectivamente. La curva de Paschen posee un mínimo, es decir, un voltaje mínimo de rompimiento. Para el aire y electrodos metálicos $V_{Smin} = 327 \text{ V}$, y ocurre para un valor de $pd = 0.567 \text{ mmHg}\cdot\text{cm}$. [14]

El mecanismo por el cual ionizaciones sucesivas de las moléculas del gas inducen el rompimiento del dieléctrico es descrito satisfactoriamente a separaciones grandes. Sin embargo, estas avalanchas no pueden ser construidas de la misma manera a distancias micrométricas debido a que el número de iones entre los electrodos es muy pequeño para iniciar una avalancha.

Algunos experimentos han reportado que, a separaciones menores a $4 \mu\text{m}$ y a una presión atmosférica de 159.6 Torr, el rompimiento ocurre porque la cantidad de átomos neutros disponibles entre los electrodos es muy baja [15]; por tanto, los voltajes de rompimiento disciernen mucho de los predichos por la curva de Paschen. Efectos adicionales como la emisión de campo generan una nueva curva conocida como la curva de Paschen modificada, ver Figura 1.

El presente artículo exhibe un montaje experimental de bajo costo, que permite reproducir los resultados de rompimiento electrostático en el rango de $1 \mu\text{m}$ a $22 \mu\text{m}$ usando electrodos de aluminio y aire a una presión de 560 Torr (presión atmosférica de Bogotá) como material dieléctrico, en el cual se obtuvo la curva de Paschen modificada. La modificación consta básicamente de una región de transición y una región de rompimiento por emisión de campo, como lo ilustra la Figura 1.

MONTAJE EXPERIMENTAL

En el esquema de la Figura 2 se presenta el montaje experimental utilizado para la medición de la curva de Paschen. El montaje se dividió en cuatro bloques: circuito de excitación, circuito de detección de chispa, electrodos y acercamiento. Los componentes se describen a continuación:

ELECTRODOS

Por la facilidad de asequibilidad, alto uso en la fabricación de dispositivos MEMS [16], bajo costo y fácil manipulación, se seleccionó Aluminio (Al) como el material para los electrodos.

La configuración de los electrodos consta de un plano o geometría punta-plano como se describe en la Figura 2a. El electrodo plano se fabricó mediante un procedimiento metalográfico (acabado espejo con una rugosidad menor a $0.3 \mu\text{m}$), mientras el electrodo curvo se fabricó partir de una barra maleable de aluminio de $780 \mu\text{m}$ de diámetro, con lijado fino y limpieza superficial con paño suave y alcohol isopropílico.

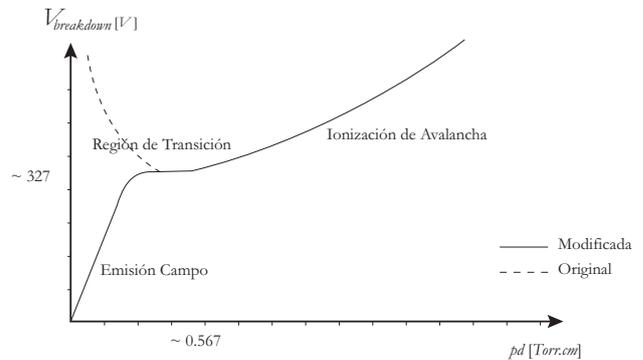


Figura. 1. Gráfica de la curva de Paschen Original y Modificada.

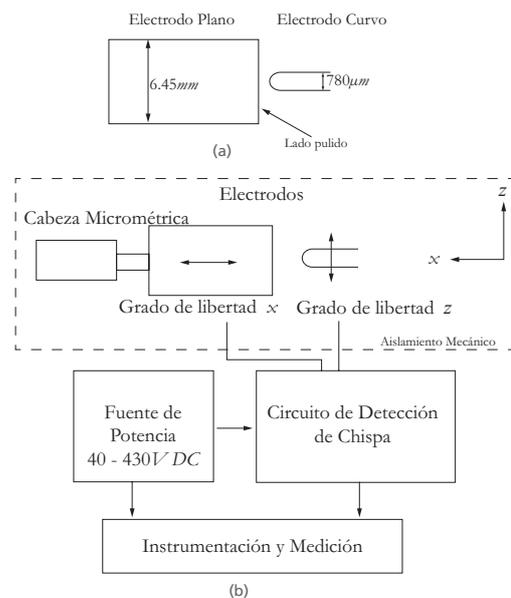


Figura 2. (a) Vista lateral de los electrodos utilizados. (b) Esquema del Montaje Experimental. Se fijó el electrodo curvo en la dirección x y se hizo la variación de distancia con el electrodo plano fijado al microposicionador. Los electrodos se aislaron mecánicamente con el fin de evitar vibraciones generadas por la fuente de potencia o movimientos del circuito de detección.

Para la conexión de los electrodos al circuito se utilizó cable de cobre trenzado envuelto en una chaqueta metálica, con el fin de reducir ruidos electromagnéticos en el sistema.

ACERCAMIENTO

La base para el acercamiento de los electrodos es un microposicionador 502102 de WPI Instruments. La Figura 3a ilustra el esquema del montaje experimental

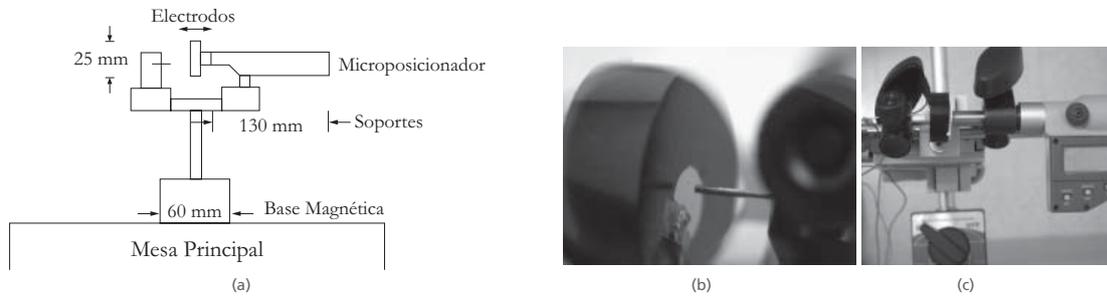


Figura 3. (a) Esquema del montaje experimental. (b) Electrodo. (c) Montaje de los electrodos y el microposicionador. Se utilizó un soporte magnético para sostener el montaje y aislarlo de vibraciones mecánicas.

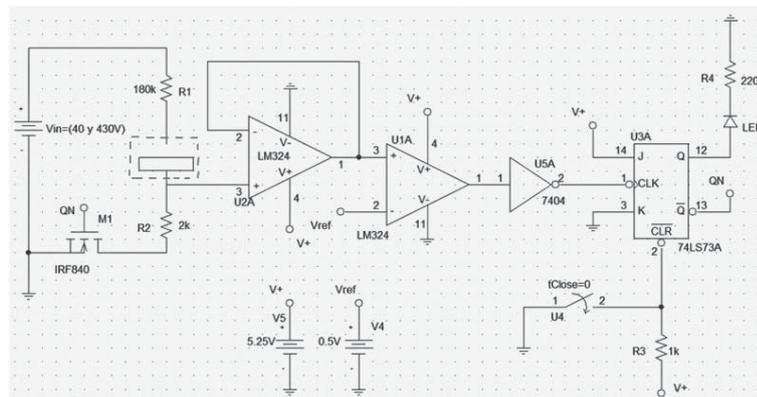


Figura 4. Circuito diseñado para la detección de chispa y el control de la corriente de rompimiento.

con sus dimensiones y en las Figuras 3b y 3c se muestra las fotografías de los electrodos y del microposicionador, respectivamente.

FUENTE DE POTENCIA

Se dispusieron dos fuentes variables reguladas de voltaje continuo, con las que fue posible ajustar niveles de tensión de entre 40 y 430 V DC, con una precisión de 1 ± 0.1 V.

CIRCUITO DE DETECCIÓN DE CHISPA

Para limitar la corriente de corto, fue necesario introducir un circuito limitador e interruptor, el cual actúa en el momento en el que se presenta el rompimiento, ver Figura 4.

En la parte izquierda de la Figura 4 se ve el circuito principal formado por la fuente DC variable con rango de actuación de 40 a 430 V DC. Esta fuente que

alimenta el circuito principal produce el rompimiento del dieléctrico a determinada distancia para un cierto voltaje. El área indicada con línea punteada representa el montaje de los electrodos. La corriente máxima en el circuito se produce a un voltaje de 430 V, en cuyo caso la corriente es del orden de 2.36 mA.

Cuando ocurre un corto entre los electrodos, se cierra el circuito y se crea un voltaje que cae en la resistencia de 2 k Ω . Se utilizó un seguidor de voltaje para aislar impedancias, se lleva este voltaje a un comparador, que detecta si hubo chispa (Salida V+) o no. El circuito está diseñado para detectar un voltaje mayor a 50 V. Se utilizó un flip flop JK de tecnología TTL el cual carga por flanco de bajada del reloj en configuración Set, de tal manera que al detectar una chispa la salida Q sea alta y QN sea baja sin importar si se producen otras conmutaciones en el reloj, esto garantiza estabilidad en el circuito.

Inicialmente se reinició el flip flop para asegurar una salida (Q) baja, de tal forma que el n-MOSFET de potencia (IRF840) se encuentra cerrado, cuando no ha pasado nada el comparador está arrojando cero voltios de tal forma que la salida del inversor 7404 es alta. Al producirse la chispa, la salida del comparador es V+ y el inversor arroja una señal baja; de esta forma, se produce un flanco de bajada que hace que el flip-flop cambie de estado, de manera tal que el LED se prende porque ahora Q es alta y el MOSFET se abre porque QN es baja. Por lo tanto, el circuito principal se abre impidiendo que el corto continúe y así se protegen los componentes de quemarse por un consumo de potencia alto cuando se trabajan altos voltajes. Debido a que la fuente tiene un grado de variación pequeño, se utilizó el encendido del LED como señal indicadora de rompimiento del dieléctrico a determinada distancia.

METODOLOGÍA

El procedimiento realizado consistió en la calibración del cero antes de hacer cualquier medida debido a la alta sensibilidad del montaje a vibraciones. Especial atención se prestó a las mediciones de separaciones menores a 4 µm, pues debido a la precisión del microposicionador (1±0.5 µm) se tomaron las muestras de mayor repetitividad en las mediciones realizadas.

La calibración del cero para cada medición es un procedimiento que consiste en poner en contacto directo las superficies, detectando así una separación entre electrodos nula con el fin de inicializar el microposicionador en cero y, posteriormente, ir separando los

electrodos para la creación de la separación deseada. Finalmente, se sube el nivel de voltaje de forma muy fina hasta observar el rompimiento de dieléctrico a través del circuito de detección.

RESULTADOS

EFFECTOS SOBRE LAS SUPERFICIES DE LOS ELECTRODOS

En la Figura 5 se pueden observar las fotografías de los electrodos antes del rompimiento, tomadas mediante microscopio óptico con iluminación superior. Los surcos resultantes del proceso de pulimento metalográfico, que se aprecian en cada figura, son lo suficientemente pequeños para no afectar representativamente la medición del voltaje de rompimiento en el rango de distancias que se trabajó. Las impurezas observadas en la Figura 5a no se pudieron determinar con certeza, probablemente se trate de impurezas de carbono agregadas al material desde su fabricación.

En la Figura 5b se observa el electrodo curvo que se le pulieron los bordes hacia adentro para reducir los efectos de borde indeseados por impurezas y para reducir el daño sobre la superficie del electrodo plano, al hacer la calibración del cero en cada procedimiento de medición. Debido al contacto entre los electrodos, las superficies pueden rayarse dependiendo de la fuerza aplicada y la rugosidad de las superficies.

En la Figura 6 se muestra el área de impacto en el electrodo plano después del rompimiento. Es claro que los rompimientos electrostáticos causan modificaciones en la superficie de los electrodos, calcinando

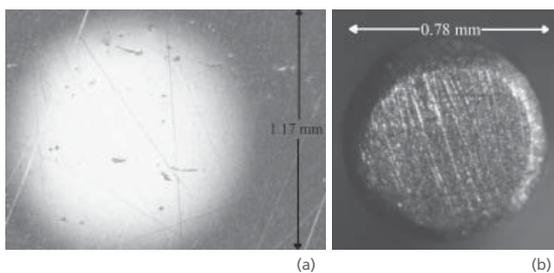


Figura 5. Superficie de los electrodos antes del rompimiento. (a) Electrodo plano. (b) Electrodo curvo.

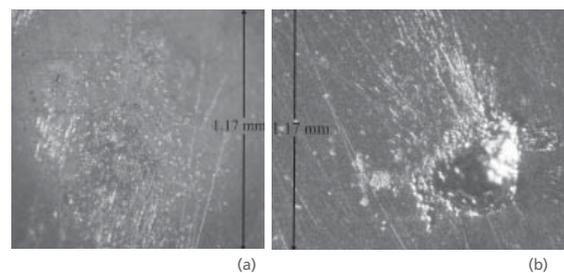


Figura 6. Electrodo plano después del rompimiento (a) VS = 310 V d = 5 µm. (b) VS = 430 V d = 22 µm.

su superficie y derritiendo el metal en esta zona, debido a la alta temperatura que se genera en el momento del rompimiento. Se puede observar en la Figura 6a cómo afecta la calibración del cero a la superficie, por el contacto entre los electrodos. La profundidad de estos defectos no es muy significativa en comparación con la distancia de separación entre electrodos.

En la Figura 6b se ilustra la magnitud del daño sobre el electrodo plano después del rompimiento. Para este caso se utilizó una metodología diferente. Se separaron los electrodos una distancia considerablemente grande y se fijó la fuente de voltaje al máximo (430 V), posteriormente se fueron acercando los electrodos utilizando el microposicionador hasta observar el rompimiento. En este caso, se observó un arco eléctrico intenso y se obtuvo un daño a la superficie mucho mayor que en el caso de la Figura 6a. Por lo tanto, se optó por utilizar la metodología descrita a continuación: fijar distancia y variar voltaje, en lugar de fijar el voltaje y variar la distancia.

MEDICIONES DE VOLTAJE DE ROMPIMIENTO A DIFERENTES SEPARACIONES

Como se mencionó anteriormente, los voltajes de rompimiento se midieron para un rango de separaciones de 1 μm a 22 μm . Para cada distancia de separación se varió el voltaje hasta observar el rompimiento. La Figura 7 presenta los resultados obtenidos luego de 5 mediciones de voltaje de rompimiento para cada distancia. Para separaciones mayores de 7 μm , los voltajes de rompimiento son mayores de 300 V; mientras que para separaciones menores de 4 μm , los voltajes de rompimiento decrecen rápidamente con la distancia. Este resultado es claramente una desventaja para usar actuadores y sensores electrostáticos de alto voltaje a distancias menores que 4 μm . Sin embargo, en la región de 4 μm a 7 μm tenemos una región de voltaje de rompimiento casi constante, lo cual puede ser conveniente para trabajar microdispositivos electrostáticos en esta región. La curva de la Figura 8 es la curva de Paschen modificada obtenida en este experimento. Los voltajes aquí medidos no presentan un mínimo ni

un rápido incremento luego de alcanzarlo, como en el caso de la curva de Paschen convencional mostrada en la Figura 8. Asimismo, para distancias menores a 5 μm la ecuación de Paschen falla al predecir valores negativos de voltaje de rompimiento, lo que claramente no tiene sentido físico.

DISCUSIÓN

Presentamos en este artículo mediciones en separaciones micrométricas usando un montaje experimental sencillo y muy económico, en comparación a otras técnicas utilizadas para medir el mismo fenómeno [16]. No obstante, el voltaje de rompimiento depende de condiciones ambientales tales como la humedad, la temperatura y la pureza del ambiente; así pues, han de esperarse resultados diferentes si se reproduce este experimento en otros lugares donde haya una diferencia significativa de estos factores. De forma general, en aire, un incremento de humedad incrementa el voltaje de rompimiento. Igualmente, un incremento de temperatura disminuye el voltaje de rompimiento [10].

Este montaje desarrollado permite comprobar la modificación de la curva de Paschen a separaciones entre 1 y 4 mm. Es importante conocer este tipo de comportamiento previo al diseño de membranas con separaciones micrométricas, evitando la confusión que puede presentarse si el diseño se basa en la curva de Paschen convencional.

Los niveles de rompimiento obtenidos son ligeramente menores a los reportados en [16], en donde el medio utilizado y el material de los electrodos fueron aire y aluminio respectivamente. Entonces, es posible inferir dos causas que representan este comportamiento. La primera de ellas hace referencia al lugar donde fueron tomados los datos de [16], es decir, a una altura menor sobre el nivel del mar, por tanto a una presión mayor; lo cual equivale a tener un mayor valor en el producto (pd) y, por tanto, el rompimiento se debe producir a un mayor valor para los mismos electrodos a una distancia predeterminada. La

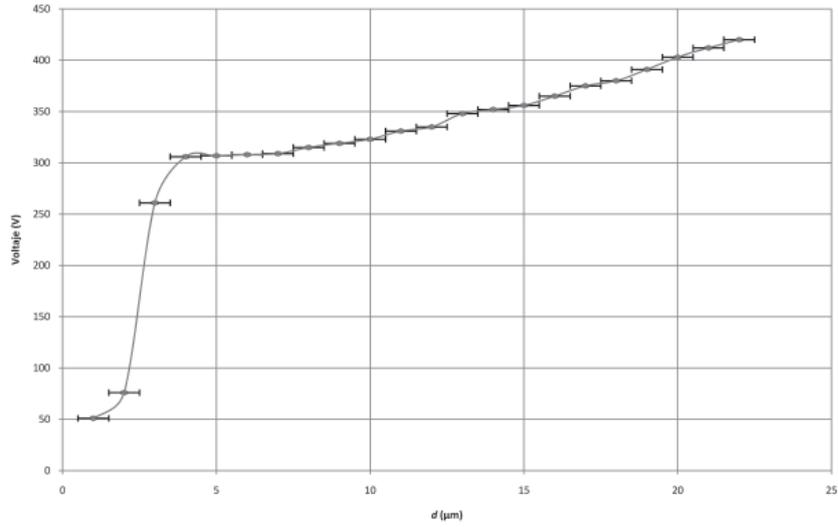


Figura 7. Curva de Paschen modificada obtenida. Las incertidumbres están dadas por desviación estándar de 5 muestras por valor medido teniendo en cuenta la precisión del microposicionador y de la fuente de voltaje.

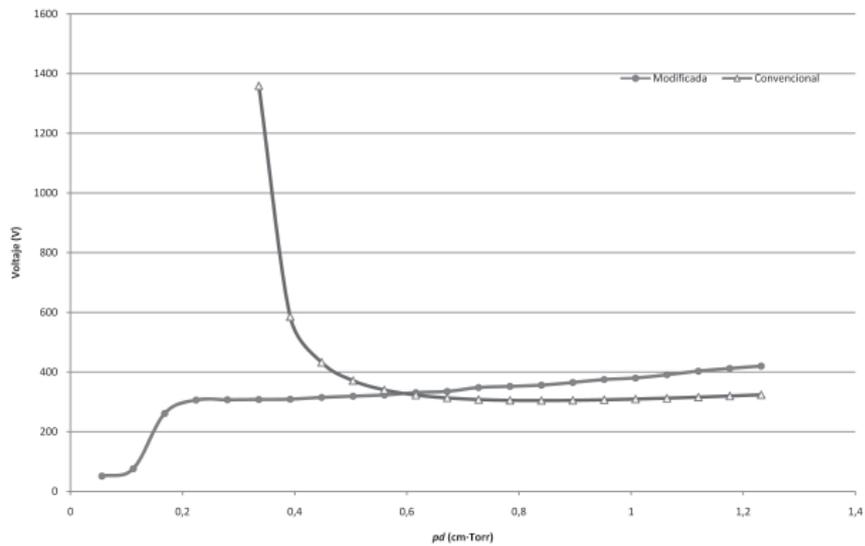


Figura 8. Curvas de Paschen Modificada y Convencional. Para la curva convencional fueron tomados los siguientes valores: $A = 15 \text{ cm}^2\text{Torr}^{-1}$, $B = 365 \text{ Vcm}^2\text{Torr}^{-1}$ y $\gamma = 10^{-2}$.

segunda aproximación, como se mencionó antes, es la comprobación indirectamente de que las impurezas obtenidas en el electrodo plano son de naturaleza conductora (de conductividad similar que el aluminio); ya que en pruebas con electrodos planos más contaminados, se produjeron una mayor cantidad de chispas pequeñas intermitentes, a voltajes ligeramente menores, en comparación con el electrodo de menor cantidad de impurezas. Se plantea la hipótesis de que el fenómeno de emisión de campo en los puntos de impurezas (puntos calientes) es mayor que en los puntos libres de impurezas a un voltaje dado, lo que conlleva a pequeñas chispas que desaparecen con la evaporación o degradación superficial del material desconocido.

CONCLUSIÓN

Los datos presentados demuestran que, a separaciones menores de 4 μm , los voltajes de rompimiento son un factor crítico en el diseño de dispositivos basados en electrodos. De acuerdo a las mediciones, en el rango de 4 a 7 μm se pueden trabajar dispositivos a un voltaje relativamente alto con separaciones relativamente pequeñas.

El trabajo a futuro debe complementarse con diferentes materiales (conductores y aislantes), incluyendo variaciones de presión, en presencia de gases entre los electrodos para separaciones menores de 2 μm . Este trabajo daría paso para la conformación de una gran base de datos clave para el diseño y fabricación de dispositivos basados en electrodos a micro o nanoescalas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo del centro de metalurgia del SENA para el desarrollo de este proyecto, así como también al Laboratorio de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad de los Andes. Un especial agradecimiento a todos los miembros de la línea de investigación en micro y nanotecnología del Centro de Microelectrónica de la Universidad, por sus

valiosos aportes, comentarios y sugerencias en el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **E. J. J. Kruglick, K. S. J. Pister.**
“Lateral MEMS Microcontact Considerations”. *Journal of Micromechanical Systems*, Vol. 8, No. 3, September 1999, pp. 264 – 271.
- [2] **W.-M. Zhang, G. Meng, D. Chen.**
“Stability, Nonlinearity and Reliability of Electrostatically Actuated MEMS Devices”. *Sensors*, Vol. 7, No. 5, May 2007, pp. 760-796.
- [3] **V. Varadan, K.J. Vinoy, K.A. Jose.**
RF MEMS and Their Applications. Wiley, ISBN: 978-0-470-84308-6, 2002.
- [4] **H. J. De los Santos.**
RF MEMS circuit design. Boston: Artech House, ISBN: 1-58053-329-9, 2002.
- [5] **D. Maric, M. Radmilovic-Radenovic and Z. Lj.**
“On parametrization and mixture laws for electron ionization coefficients”. *Eur. Phys. J. D*. Vol. 35, 2005, pp. 313- 321.
- [6] **F. Paschen.**
“Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz”. *Annalen der Physik*, Vol. 273, No. 5, 1889, pp, 69-75
- [7] **W. S. Boyle and P. Kisliuk.**
“Departure from Paschen’s Law of Breakdown in Gases”. *Phys. Rev.* Vol. 97, 1955, pp. 255-259.
- [8] **E. Wagenaars, M. D. Bowden, G. M. W. Kroesen.**
“Measurements of Electric-Field Strengths in Ionization Fronts during Breakdown” *Phys. Rev. Lett.* Vol. 98, No. 7, pp. 075002, 2007.

- [9] **N. St. J. Braithwaite.**
 “Introduction to gas discharges”, *Plasma Sources Sci. Technol.* Vol. 9, No. 4, 2000, pp. 517-527.
- [10] “High Voltage Experimenter’s Handbook”. Jim Lux
 (1998). 18 March 2003. Fecha de consulta: Marzo de 2008.
 Disponible: <http://home.earthlink.net/~jimlux/hv/paschen.htm>
- [11] **M. Radmilović – Radjenović and B. Radjenović.**
 “The influence of the ion-enhanced field emission on microwave breakdown in microgaps”. *Plasma Sources Sci. Technol.* Vol. 16, 2007, pp. 337-340.
- [12] **A.V. Phelps and Z. Lj. Petrovic.**
 “Cold-cathode discharges and breakdown in argon: surface and gas phase production of secondary electrons”.
Plasma Sources sci. Technol. Vol. 8, No. 3, 1999.
- [13] **E.M. Bazelyan and Yu. P. Raizer.**
Spark Discharge. Boca Raton: CRC Press, 1998, pp. 32.
- [14] **E. Hourdakis, B. J. Simonds and N. M. Zimmerman.**
 “Submicron gap capacitor for measurement of breakdown voltage in air”. *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 77, No. 3, 2006, pp.034702 - 034702-4.
- [15] **F.W. Strong, J.L. Skinner, A.A. Talin, P.M. Dentinger and N.C. Tien.**
 “Electricalbreakdown response for multiple-gap MEMS structures”, IEEE 44th Annual International Reliability Physics Symposium, pp.421-426, 2006.
- [16] **J.M. Torres, R.S. Dhariwal.**
 “Electric Field Breakdown at Micrometre separations in Air and Vacuum”. *Microsystem Technologyies*, Vol. 6, No. 1, November 1999, pp. 6-10.