

ESTUDIO DE LOS HACES ELECTRÓNICOS EN LA DESCARGA ELÉCTRICA DE ALTO VOLTAJE A BAJAS PRESIONES

H. J. Dulce Moreno¹, Universidad Francisco de Paula Santander. P.A. Tsygankov², Bauman Moscow State Technical University. V. Dugar-Zhabon³, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia. E.D. V. Niño⁴, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Santander, Colombia. F.F. Parada⁵, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia.

Recibido Abril 29, 2011 – Aceptado septiembre, 2011

<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v5n2.a03>

Resumen— Para realizar el estudio de los haces electrónicos en la descarga eléctrica de alto voltaje a bajas presiones se implementó el dispositivo JUPITER (Joint Universal Plasma and Ion Technologies Experimental Reactor) que está fundamentado en las ideas de implantación iónica tridimensional (3DII) y un sistema de reglas especiales de acrílico que determinan con alta precisión la geometría de los haces electrónicos.

Adicionalmente se empleó el programa de análisis gráfico Matrox Inspector 2.0 para la obtención del perfil de la línea (RGB line profile) y el código KARAT para la realización de una simulación tridimensional del movimiento de los electrones de prueba.

En este artículo se presenta un estudio de la geometría de propagación de los haces electrónicos que permite hacer conclusiones sobre la estructura espacial de la descarga y, en particular, sobre las dimensiones de la región de aceleración de los electrones (la región catódica).

Palabras clave— Curva de Paschen, haz de electrones, monoenergicidad.

Abstract— For the study of electron beams in high voltage electrical discharge at low pressures implemented the device JUPITER (Joint Universal Plasma and Ion Technologies Experimental Reactor) is based on the ideas of ion implantation dimensional

(3DII) and a set of special strips acrylic determine with high precision geometry electron beams.

Additionally we used the mapping program Matrox Inspector 2.0 to obtain the profile online (RGB line profile) and the KARAT code for conducting a three-dimensional simulation electron movement test.

This article presents a study of the geometry propagation of electron beams that allows conclusions about the spatial structure of the discharge and, in particular, about the size of region acceleration of electrons (cathode region).

Keywords— Curve Paschen, electro beam, monoenergicidad.

I. INTRODUCCIÓN

En el espacio interelectrónico de una descarga de alto voltaje a baja presión, encendida en rama izquierda de la curva de Paschen, tienen lugar muchos procesos elementales con participación de electrones, fotones, iones, partículas excitadas, átomos y moléculas neutras; y de otra parte hay diversos mecanismos que pueden iniciar y mantener encendida la descarga [1].

Por estas razones es difícil elaborar un modelo basado en una sola idea y utilizar las leyes de semejanza para el análisis de los procesos que se observan en este tipo de descargas. Resulta más adecuado si se considera la descarga de alto voltaje en la rama izquierda de la curva de Paschen como una familia de descargas para las cuales, en dependencia con las condiciones externas, pueden entrar en juego unos u otros mecanismos de encendido. Pero hay una propiedad común: todas estas descargas son generadoras de haces de electrones acelerados con una distribución prácticamente monoenergética (sin embargo esto sólo se da en condiciones de un voltaje estable en el espacio interelectrónico) y con la energía proporcional al voltaje aplicado a la descarga. Por eso, todas las estimaciones e ideas siguientes están basadas en el principio de monoenergicidad de haz electrónico [2-3].

¹H. J. Dulce Moreno, Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica - GITEC, imparte docencia en la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Norte de Santander, Colombia (correo e.: hdulce2001@yahoo.com).

²Piotr Tsygankov investigador Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Rusia (correo e.: tsyg@bmstu.ru).

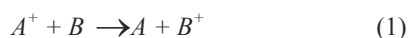
³Valeriy Dugar-Zhabon, Grupo de Investigación en Física y Tecnología del Plasma – FITEK, imparte docencia en la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia (correo e.: vdougar@uis.edu.co).

⁴Ely Dannier V. Niño, Grupo de Investigación en Tecnología del Plasma – GINTEP, Imparte docencia en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, Santander, Colombia (correo e.: ely.valbuena@upb.edu.co).

⁵Fredy F. Parada, Grupo de Física y Tecnología del Plasma – FITEK, estudiante de maestría en física de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia (correo e.: confredyfabian@gmail.com).

Los procesos acaecidos tanto en el espacio interelectrónico como en el cátodo están rigurosamente ligados con los parámetros de la componente de electrones rápidos. Un análisis de los datos experimentales muestra que la única fuente de energía que garantiza el mantenimiento del estado cuasiestacionario del plasma en el espacio interelectrónico son los electrones que se emiten desde la superficie del cátodo y son acelerados hasta una energía de decenas de kilo-electrón-voltios.

Una visión adoptada en este sentido [4-6] es: los electrones generados en el cátodo debido a la emisión secundaria, bajo la acción de un flujo de iones y partículas neutras de intercambio de carga, se aceleran en el espacio de la caída catódica hasta energías significativas (decenas de kilo-electrón-voltios) y su interacción con el ánodo, y posiblemente la interacción colectiva “plasma inicial-haz”, generan un plasma en el espacio de la descarga que produce un flujo de iones y átomos neutros rápidos que alcanzan el cátodo. De esto resulta un régimen auto-sostenido de la descarga. Las partículas neutras de intercambio se forman en la reacción tipo:



en la cual el ión rápido A^+ atrae un electrón del átomo B y se convierte en una partícula neutra rápida A que se denomina partícula de intercambio.

Tomando en consideración el papel determinante que juegan los electrones rápidos en el sostenimiento de la descarga es necesario hacer un estudio, mediante registros y estimaciones cualitativas de los haces electrónicos, para definir las propiedades de los procesos plásmicos y catódicos, que son específicos para la descarga que tratamos, como base para la realización del proceso de implantación iónica tridimensional vía plasma [7]. En definitiva esto permite determinar su puesto en la familia de descargas en la rama izquierda de la curva de Paschen y marcar las posibles vías de optimización y control de posibilidades tecnológicas del dispositivo.

Además, un estudio de la geometría de propagación de los haces electrónicos permite hacer conclusiones sobre la estructura espacial de la descarga y, en particular, sobre las dimensiones de la región de aceleración de los electrones (la región de caída catódica). En realidad en dependencia con la configuración y grosor de esta región podemos esperar que sea o no un haz electrónico que más o menos homogéneamente llene el volumen de descarga (haz semiesférico

con radiación en 2π radianes) o algunos haces separados que emergen de diferentes zonas de la superficie del cátodo. En el último caso es evidente que deben existir regiones sin haces. Basándose en razones geométricas y en la curva de Paschen se puede suponer que con una configuración dada del espacio de la descarga el haz electrónico más intenso estará a lo largo del eje longitudinal de la cámara de vacío sobre la superficie del cátodo, ya que aquí el parámetro pd es el mayor [8-9].

II. EXPERIMENTAL

La descarga estudiada está en un volumen limitado por electrodos con una geometría bastante compleja (ver Fig. 1), que difiere significativamente con los tubos cilíndricos de descarga y con los electrodos planos paralelos tradicionalmente utilizados para los estudios de las propiedades del plasma tanto de bajo como de alto voltaje. Además el área de las superficies electrónicas prácticamente coincide con la sección transversal de los tubos que no corresponde con nuestro caso [10]. Por estas circunstancias no es posible establecer anticipadamente la configuración de los haces electrónicos en la cámara del JUPITER (Joint Universal Plasma and Ion Technologies Experimental Reactor) [11].

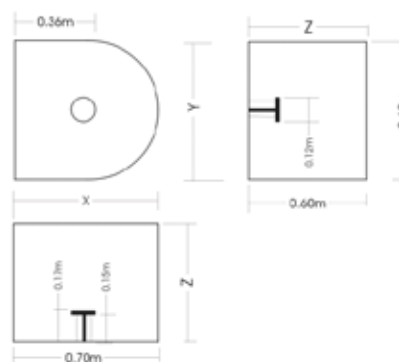


Fig. 1. Vistas de la cámara de descarga

La estimación de la geometría de propagación de los haces electrónicos que se forman en la descarga del reactor JUPITER, se basa en el hecho de que un flujo de electrones de alta energía, aún de intensidad débil, durante tiempos de exposición adecuados produce daños por termo-radiación en la interacción con materiales plásticos polímeros [12].

De acuerdo a lo anterior se coloca en la cámara de descarga (ver Fig. 2), de manera apropiada, un número de reglas especiales de acrílico que determinan con una precisión alta la geometría de

los haces electrónicos. Este método nos permite hacer registros en cercanía de la superficie que emite los electrones, que para nuestro caso está bajo un potencial de decenas de kilo-voltios.

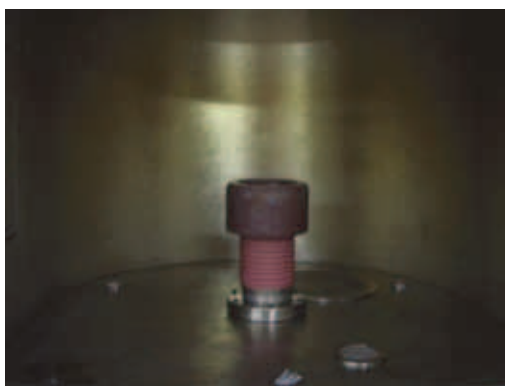


Fig. 2. Cámara de descarga del reactor JUPITER

Las regletas de registro se elaboran de acrílico transparente de 2,0 mm de grosor, 10 mm de ancho y de 400 hasta 600 mm de longitud. Las reglas se colocan en la cámara perpendicularmente al eje longitudinal entre la superficie superior del cátodo y el techo de la cámara de vacío, a alturas diferentes sobre la superficie del cátodo y paralelamente al eje transversal que une el centro de la puerta de la cámara con el fondo de la pared cilíndrica, es decir a lo largo del eje asimétrico. Durante un ciclo de tratamiento dentro del espacio de la descarga se coloca una sola regla de tal manera que no se perturbe la descarga.

Un tiempo de 5 minutos de exposición, en una descarga de 20 kV, 30 Hz y 0,25 ms con corriente media de 3,75 mA es suficiente para que las peculiaridades geométricas del haz de electrones se fijen adecuadamente [13-14].

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Fig. 3 se presentan las reglas después de la exposición al haz electrónico. Estas tres reglas fueron colocadas perpendicularmente al flujo de electrones a diferentes alturas sobre el cátodo (100mm, 200mm, 300mm). La acción destructiva se ejerce solamente sobre la cara dirigida hacia el cátodo, la parte opuesta queda invariable. También se observa que el grado de destrucción depende significativamente del radio del haz, es decir al utilizar este método se puede estimar cualitativamente un cuadro de distribución de intensidad a lo largo del radio del haz.

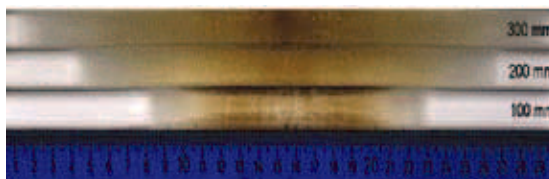


Fig. 3. Regletas después de la exposición en la descarga

De la vista externa de las reglas de medición se puede hacer solamente una estimación cualitativa de la intensidad del flujo de electrones de alta energía, aunque al medir la distribución del coeficiente de transparencia es posible determinar su correlación con la intensidad del haz, pero solamente s  es conocida la dependencia de cambio de las propiedades ópticas del vidrio orgánico con la potencia del flujo de electrones que inciden sobre la regla. Tal dependencia se espera no lineal (sin saturación clara) y es un problema hacer una calibración correcta del método con un flujo de referencia de intensidad controlable.

En la Fig. 4 se representa la geometría de los haces electrónicos en concordancia con los registros de las reglas expuestas a los haces electrónicos en la cámara de descarga. La forma de los haces electrónicos esta reconstruida a partir del método descrito. La localización de las reglas mostradas en la Fig. 3 y los puntos característicos de acción del flujo de electrones rápido se anotan en la Fig. 4. Las mayúsculas A, B, C representan las áreas sobre la superficie de la cámara de vacío ( nodo) donde se frenan los haces correspondientes a, b y c.

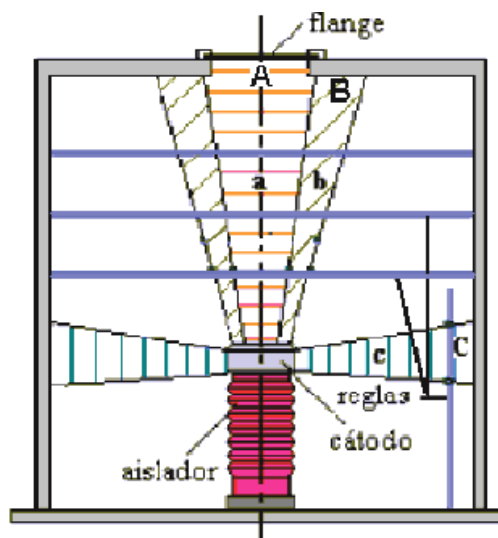


Fig. 4. Disposición de los haces electrónicos y las regletas en la cámara

Cualitativamente a partir del análisis de la vista externa de las reglas de registro con igual tiempo de exposición bajo un flujo electrónico se puede ver que la región (a) del haz central es más intensa y después sigue la región (b) con la intensidad mucho menor.

En este caso basándonos en un análisis de los daños se destacan dos zonas que se ven claramente en las reglas y que corresponden a dos regiones características en la sección transversal del haz de electrones (ver Fig. 4): la región de intensidad alta (a) y la región de intensidad moderada con la dimensión característica (b). Adicionalmente en una regla ubicada sobre una de las paredes laterales de la cámara se observó una débil huella de un haz de electrones emitidos desde la superficie cilíndrica lateral del cátodo (c).

En la Fig. 5 se presenta el perfil de línea (RGB Line profile), que se obtuvo con ayuda del programa de análisis gráfico Matrox Inspector 2.0, de la regleta ubicada a 200 mm sobre el cátodo, es decir la regla del medio en la Fig. 3.

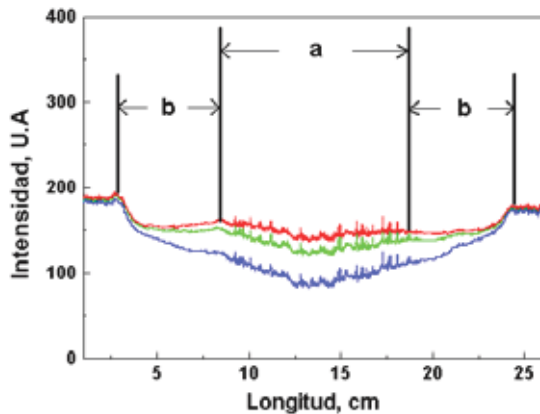


Fig. 5. Estado Perfil de línea (RGB) de regleta obtenido con Matrox Inspector 2.0

La primera observación que se puede realizar de la Fig. 5, es que la distribución de intensidades a lo largo de la regleta es aproximadamente simétrica, lo que permite concluir que los efectos de la asimetría de la cámara son prácticamente despreciables; esto debido a que la distancia interelectrónica es lo suficientemente grande. En segundo lugar el perfil permite definir claramente las dos zonas (a) y (b) de intensidad del haz electrónico mencionadas anteriormente.

Como se puede observar en la Fig. 6 una simulación tridimensional del movimiento de electrones de prueba, realizada con el código KARAT [15], para una geometría asimétrica como

la del JUPITER, permite ratificar la simetría del movimiento de los electrones.

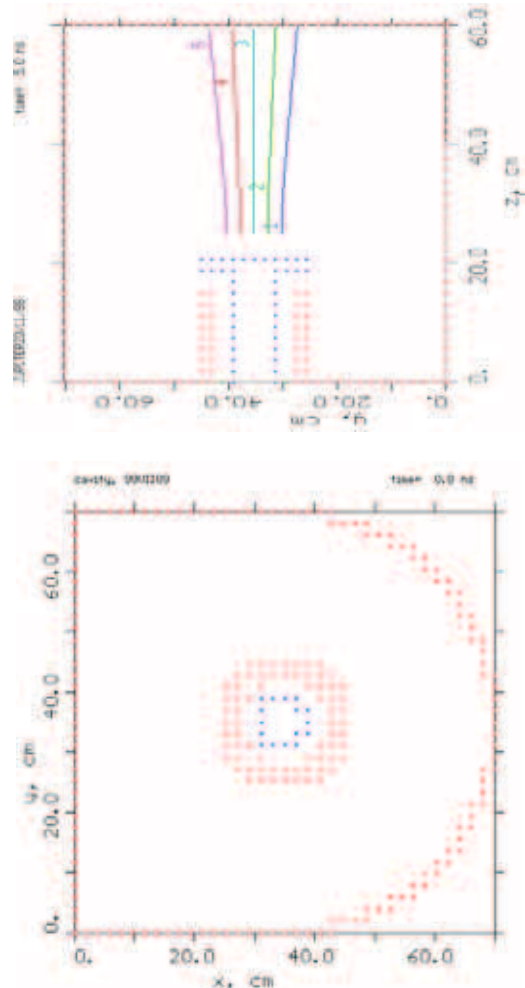


Fig. 6. Simulación con el código KARAT del movimiento de electrones de prueba para un potencial de 20 kV

En la Fig. 4 se ve que los haces electrónicos son uniformemente divergentes. La linealidad del haz central se controla cerca de la superficie del cátodo (la distancia desde la superficie hasta la primera regla es $h = 100$ mm) y cerca del ánodo ($h = 300$ mm). Los parámetros geométricos medidos se enmarcan precisamente sobre los conos (a), (b) que fueron reconstruidos por mediciones en $h = 100$ mm, 200 mm y 300 mm. Hay varios posibles mecanismos que conducen a la divergencia del haz.

En realidad la zona de transición de la superficie superior plana del cátodo en la cilíndrica perturba significativamente el campo eléctrico cerca del borde de la superficie superior. Los electrones emitidos por las regiones cerca del eje vertical del cátodo se aceleran por el gradiente del campo perpendicular a

la superficie horizontal mientras que los electrones emitidos por la superficie cilíndrica se aceleran por el gradiente del campo perpendicular a esta superficie. Para los electrones emitidos desde regiones del borde, además de la componente vertical, aparece la componente radial del campo de aceleración que produce una divergencia homogénea del haz (a), (b). De manera análoga se puede explicar la divergencia de haces desde la superficie cilíndrica (c).

La distribución no homogénea de la densidad de la corriente iónica por la superficie también puede dar como resultado la aparición de una divergencia muy pequeña del haz; especialmente este mecanismo se refiere al haz (a) que se forma en una superficie catódica plana homogénea y no se afecta por los efectos de borde los cuales son despreciables.

Luego las mediciones de control realizadas en el reactor JUPITER demostraron que la topografía de los haces electrónicos no cambia cuando se sustituye el material del cátodo por el cobre, aluminio, titanio o hierro, y depende exclusivamente de la geometría del cátodo.

En la Fig. 7 se presenta la distribución de los haces obtenida por las regletas en el JUPITER, y la simulación hecha de acuerdo con los resultados obtenidos en el reactor. Como resultado de los experimentos descritos anteriormente se lograron estudiar las peculiaridades geométricas de los haces electrónicos cuyas características dependen de la forma y no del material del cátodo, además se consiguió estimar el grosor característico de la zona cerca del cátodo en la cual se aceleran los electrones.

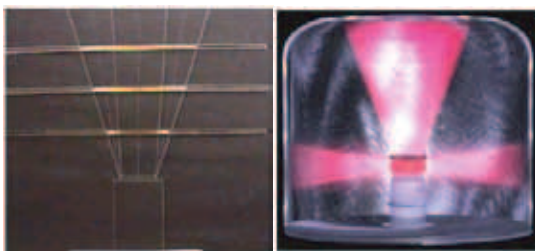


Fig. 7. Fotografía de las regletas en la cámara de descarga (izquierda) y reconstrucción por simulación de los haces electrónicos en la cámara del prototipo (derecha)

IV. CONCLUSIONES

Se determinaron las peculiaridades geométricas de los haces electrónicos que se forman en la descarga. Se observó la presencia de por lo menos dos haces no cruzados provenientes de las partes laterales (cilíndrica) y superior del cátodo que evidencia que la capa catódica, donde se aceleran los electrones es delgada.

Se realizaron medidas por diferentes métodos las densidades de la corriente electrónica en el haz y en la superficie catódica. Para diferentes materiales del cátodo la densidad de la corriente para el haz central más intenso es igual 2-20 A/m².

Se observó una disminución de la intensidad del haz electrónico en el proceso de tratamiento.

Las mediciones hechas en el prototipo permitieron determinar la carga que transporta la componente electrónica de la corriente de descarga. Estos datos son importantes para determinar las características electrofísicas de los cátodos y para estimar la efectividad energética del proceso de implantación iónica. Los estudios y las estimaciones de parámetros de los haces electrónicos permiten pasar al estudio detallado de la estructura espacial de la descarga y a la propuesta de una fenomenología de los procesos acaecidos en la descarga de alto voltaje en la rama izquierda de la curva de Paschen.

REFERENCIAS

- [1] Zavialov M.A., Krendel Y.E., Navikov A.A., Shanturin L.P., Plasma processes in electron guns for technological applications, Energoatom, Moscow, (1989) 256.
- [2] C.O. Bautista Mendoza, H.J. Dulcé Moreno, V.D. Dugar-Zhabon, Diagnostico de un plasma generado por descargas de alto voltaje a bajas presiones, Rev. Col. Fis. Vol. 35 No. 2, (2003) 328-331.
- [3] C.O. Bautista Mendoza, R. Cabanzo H., V.D. Dugar-Zhabon, Caracterización espectroscópica de una descarga de alto voltaje a bajas presiones, Rev. Col. Fis. Vol. 38 No. 2, (2006) 854-857.
- [4] Kreindel U.E, Plasma sources of electrons, Atom, (1977) 145.
- [5] Novikov A.A., Electron sources based on high voltage glow discharge, Energoatom, Moscow, (1983) 96.
- [6] Femsier R.F., Maheiner W.M., Meger R.A., et al, Physics of Plasmas 5, (1998) 2137-2143.
- [7] H.J. Dulcé Moreno, V.D. Dugar-Zhabon, P.A. Tsygankov, Implantación Iónica, Respuestas No. 8, (2003) 19-30.
- [8] McClure G.W., High voltage glow discharge in D₂ gas. Diagnostic measurements, Phys. Rev. 124 (4), (1961) 969-982.
- [9] Conrads H., Schmidt M., Plasma source Sci. Technol., 9, (2000) 441-454.
- [10] Vladimir I. Khvesyuk, Piotr A. Tsygankov, The use of a high-voltage discharge at low pressure for 3D ion implantation, Surface and Coatings Technology 96, (1997) 68-74.
- [11] V.D. Dugar-Zhabon, J. Castro Blanco, H.J. Dulcé Moreno, P.A. Tsygankov, Device "Jupiter" for ion implantation, Rev. Col. Fis. Vol. 31 No. 2, (1999) 181-184.
- [12] V.D. Dugar-Zhabon, J. Dulce Moreno, P.A. Tsygankov, High voltage pulse discharge for ion treatment of metals, Rev. Sci. Instrum. 73, (2002) 828-830.
- [13] H.J. Dulce Moreno, V.D. Dugar-Zhabon, C.R. Cabrera, Estudio mediante XPS de un acero al carbono implantado con nitrógeno por medio de descargas de alto voltaje a bajas presiones, Rev. Col. Fis. Vol. 33 No. 2, (2003) 332-336.

implantation effect on corrosion properties of the AISI/SAE 1020 steel, Phys. Stat. Sol. 2 No 10 (2005) 3778-3781.

- [15] Tarakanov V. User's manual for code KARAT. Ver. 7.09. Moscow (1999) 114p.

BIOGRAFÍA



Héctor Jaime Dulcé Moreno. MSc. en Física Universidad Industrial de Santander - UIS, Ph.D en Ciencias Naturales, UIS, profesor titular Universidad Francisco de Paula Santander. Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica - GITEC.



Piotr A. Tsygankov. B.D. in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University – BMSTU, M.Sc. Ingeniero Diplomado en Tecnologías de Plasma, BMSTU, Ph.D. in Plasma Technologies (Engineering Sciences). Director del Laboratorio EM 4.2.2 de BMSTU.



Valeriy Dugar-Zhabon. MSc. en Física Universidad Estatal de Moscú Lomonosov, UES, Ph.D en Física Universidad Estatal de Moscú Lomonosov, UEML, profesor titular Universidad Industrial de Santander. Director Grupo de Investigación en Física y Tecnología del Plasma - FITEK.



Ely Dannier V. Niño. MSc. en Física Universidad Industrial de Santander -UIS, Investigador ad-honorem Grupo de Investigación en Física y Tecnología del Plasma – FITEK - UIS, profesor asistente Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. Director Grupo de Investigación en Tecnología del Plasma - GINTEP.



Fredy Fabian Parada Becerra. Físico Universidad Industrial de Santander -UIS, Profesor Escuela de Física UIS, Grupo de Investigación en Física y Tecnología del Plasma. - FITEK.