



Informe Técnico

Implementaciones y mejoras en el sistema de alimentación por radiofrecuencia, para el proceso de erosión catódica.

Alejandro Esparza García

Martín Briseño García

Raúl Ruvalcaba Morales

10 de junio de 2018

Financiamiento:

UNAM

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología

Financiamiento interno

Implementaciones y mejoras en el sistema de alimentación por radiofrecuencia, para el proceso de erosión catódica

Alejandro Esparza García¹

Martín Briseño García¹

Raúl Ruvalcaba Morales²

¹Fotofísica y Películas Delgadas, ICAT.

²Fotónica de Microondas, ICAT.

Resumen

El depósito de películas delgadas dieléctricas por erosión catódica, partiendo de una fuente de material dieléctrico, se lleva a cabo, mediante la aplicación de una señal de radiofrecuencia (RF) acoplada a los electrodos de un sistema de erosión catódica; de ahí la importancia de su correcto funcionamiento. Debido a que la señal transmitida por un generador de radiofrecuencia a un diodo receptor, debe ser absorbida por éste último de la manera más eficiente posible, es necesario cerciorarse que la potencia de salida de la fuente, sea prácticamente igual a la potencia de entrada en el diodo receptor; es decir, que la potencia reflejada tienda a cero. Se han detectado dos problemas en el sistema de erosión catódica durante la generación de plasma por RF: 1) Generación importante de reflexión de señal de RF, 2) Generación de ruido que afecta a diversos aparatos electrónicos que forman parte del sistema. Con el fin de aminorar o desaparecer dichos efectos, se planteó la necesidad de analizar y mejorar el sistema de conexión entre la fuente y el diodo receptor; para lo cual, se llevó a cabo un robustecimiento de la línea por la cual se transmite la señal de RF y la tierra, además se llevó a cabo el diseño e implementación de una estructura mecánica para el confinamiento de la señal. En éste informe técnico se presenta un análisis del estado inicial del sistema de conexión, y se presenta también la configuración del sistema mejorado con los resultados obtenidos.

Índice

Nomenclatura

Introducción

1	Descripción general del sistema de erosión catódica.....	4
1.1	Ruido en aparatos electrónicos.....	6
1.2	Señal o potencia reflejada.....	7
1.3	Sobrecalentamiento del cable coaxial.....	8
2	Implementaciones correctivas.....	9
2.1	Disminución de ruido.....	9
2.2	Señal reflejada y sobrecalentamiento del cable coaxial.....	9
3	Resultados.....	12

Introducción

La síntesis de materiales metálicos, dieléctricos y semiconductores de diversas características y propiedades, tiene gran importancia para la industria, debido a la tendencia requerida de miniaturización de los elementos electrónicos; lo cual se ha llevado a cabo gracias al desarrollo de tecnologías adecuadas. Una de las técnicas más utilizadas es la erosión catódica asistida por magnetrón (sputtering), el cual puede implementarse en dos modalidades: 1) por DC (voltaje continuo) para el depósito de películas metálicas y 2) por radiofrecuencia (voltaje alterno) para la síntesis o el depósito de películas delgadas dieléctricas, partiendo de un blanco dieléctrico. Desafortunadamente, la implementación de sistemas de erosión catódica por RF, trae consigo diversos problemas dependiendo del lugar de colocación y de la forma de conexión de los equipos involucrados, lo cual se ve reflejado de manera importante, en la potencia de la señal de radiofrecuencia transmitida, en la eficiencia del proceso de erosión catódica e incluso en la seguridad del sistema; más aún, la incorrecta instalación de los equipos de RF, son la causas más comunes que provocan daños y decaimiento de su tiempo de vida.

El sistema de erosión catódica del laboratorio de Películas Delgadas, fue creado hace más de 20 años, durante los cuales ha sufrido diversas modificaciones; sin embargo, la configuración en la conexión del generador de RF con el sistema de erosión catódica ha permanecido sin cambios, a pesar de que se producían pequeños problemas esporádicos de ruido y de potencia reflejada. Con el paso del tiempo, estos problemas comenzaron a ser más frecuentes, aumentando su intensidad y produciendo un efecto mayor en los equipos aledaños. Debido a esto, en el presente trabajo, se llevó a cabo un análisis de la configuración en la conexión de los equipos involucrados, con el fin de disminuir en la mayoría de lo posible dichos efectos. Principalmente se realizaron dos acciones:

- 1) Revisión del sistema de aterrizado de los equipos involucrados.
- 2) Robustecimiento de la conexión entre el acoplador de impedancias y el diodo del sistema de erosión catódica.

En el capítulo 1 de este informe, se presentan los fundamentos básicos de la técnica de erosión catódica, y una descripción general del sistema de erosión catódica del laboratorio de películas delgadas. En el capítulo 2, se exponen los problemas que se presentan durante el proceso, cuando se lleva a cabo por radiofrecuencia, y cómo afectan al correcto funcionamiento de aparatos electrónicos cercanos. En el capítulo 3, se presentan las implementaciones y mejoras que se llevaron a cabo, con el fin de desaparecer o disminuir los problemas expuestos. Finalmente, se presentan las conclusiones derivadas del trabajo realizado.

1 Descripción general del sistema de erosión catódica.

A grandes rasgos la técnica de erosión catódica se refiere al desprendimiento de material de la superficie de un sólido o un líquido debido al intercambio de momento, asociado al bombardeo superficial llevado a cabo por partículas energéticas. Una parte de las partículas desprendidas son dirigidas hacia un sustrato, y se depositan sobre su superficie, formando así una película de recubrimiento (figura 1).

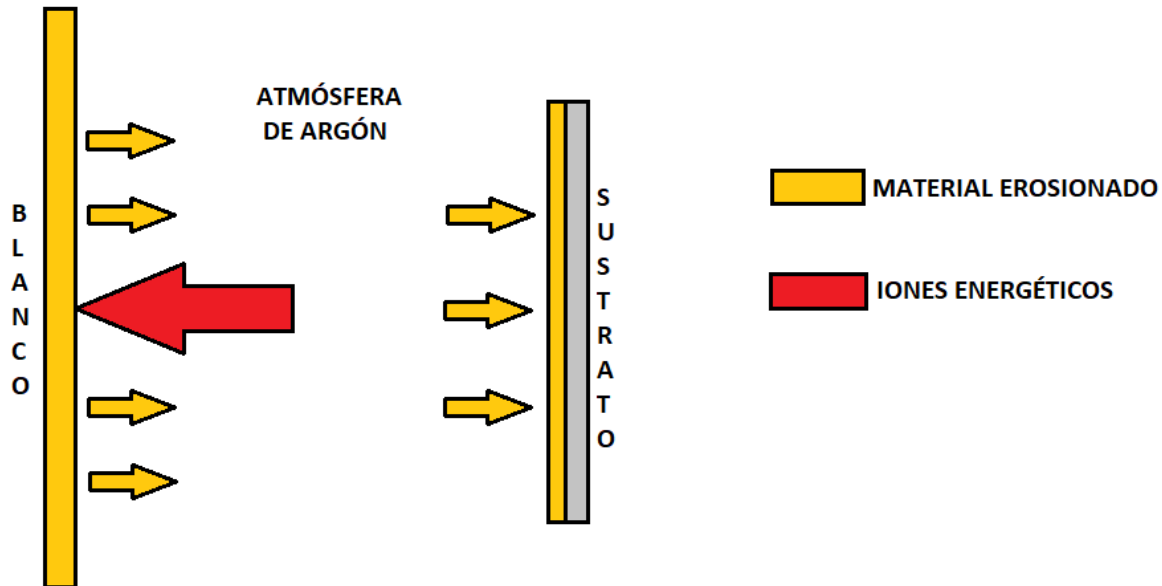


Figura 1. Representación esquemática de la generación de una película de un material determinado, sobre un sustrato, mediante el proceso de erosión catódica.

Existen dos formas de llevar a cabo el depósito de películas delgadas de materiales dieléctricos por la técnica de erosión catódica; en atmósfera reactiva (DC) y por radio frecuencia (RF). En el caso de atmósfera reactiva, el proceso está limitado al uso de blancos metálicos; además de que es necesario el ingreso de oxígeno al proceso. En cambio, se ha observado que la erosión catódica en modo RF puede ser usado como catalizador de reacciones químicas; además de que, el uso de radio frecuencia permite que el proceso de erosión catódica se lleve a cabo a presiones menores al proceso normal.

Dentro de la amplia gama de técnicas para el depósito de películas delgadas, la erosión catódica en la modalidad de radiofrecuencia, se distingue por ser una de las más indicadas en lo que al depósito de películas delgadas de materiales dieléctricos se refiere; esto gracias a su versatilidad para el depósito de óxidos metálicos y cerámicos (Maissel y Gang, 1970), respetando en gran medida la estequiometría del blanco fuente.

Los materiales dieléctricos no pueden ser depositados por la técnica de erosión catódica en modo DC, partiendo de una fuente o blanco dieléctrico, ya que si se lleva a cabo una simple sustitución de un blanco metálico por uno dieléctrico, el proceso de erosión catódica no puede generarse de una manera sostenida, debido a que se produce una aparición inmediata de iones positivos en la superficie del blanco (Kiyotaka Wasa et al, 2004).

Los elementos principales que componen el sistema de erosión catódica del laboratorio de películas delgadas, pueden verse en la figura 2, y son los siguientes: bombas de vacío, cámara de vacío, diodo blanco-sustrato, magnetrón y finalmente, fuentes de DC y RF. El sistema de bombas de vacío, incluye una bomba mecánica DUO 016B, y una bomba turbo molecular TPH 170, ambas de la marca Pfeiffer-Balzars. La cámara de vacío es cilíndrica, de 20 pulgadas de diámetro, y 15 pulgadas de altura. Cuenta con 3 diferentes locaciones para blancos de 3 pulgadas, y una para blancos de 1 pulgada. Se cuenta con un magnetrón de 3 pulgadas y uno más de 1 pulgada. La fuente de DC y el sistema de generación de RF son ambos de la marca Advanced Energy. El magnetrón es un dispositivo fundamental en la operación

del sistema, ya que al ser añadido, permite llevar a cabo el proceso a presiones más bajas, además de aumentar la tasa de depósito sobre el sustrato; en pocas palabras, permite llevar a cabo el proceso de erosión catódica de una manera más eficiente. El magnetrón se coloca detrás del blanco, como puede verse en la figura 2.

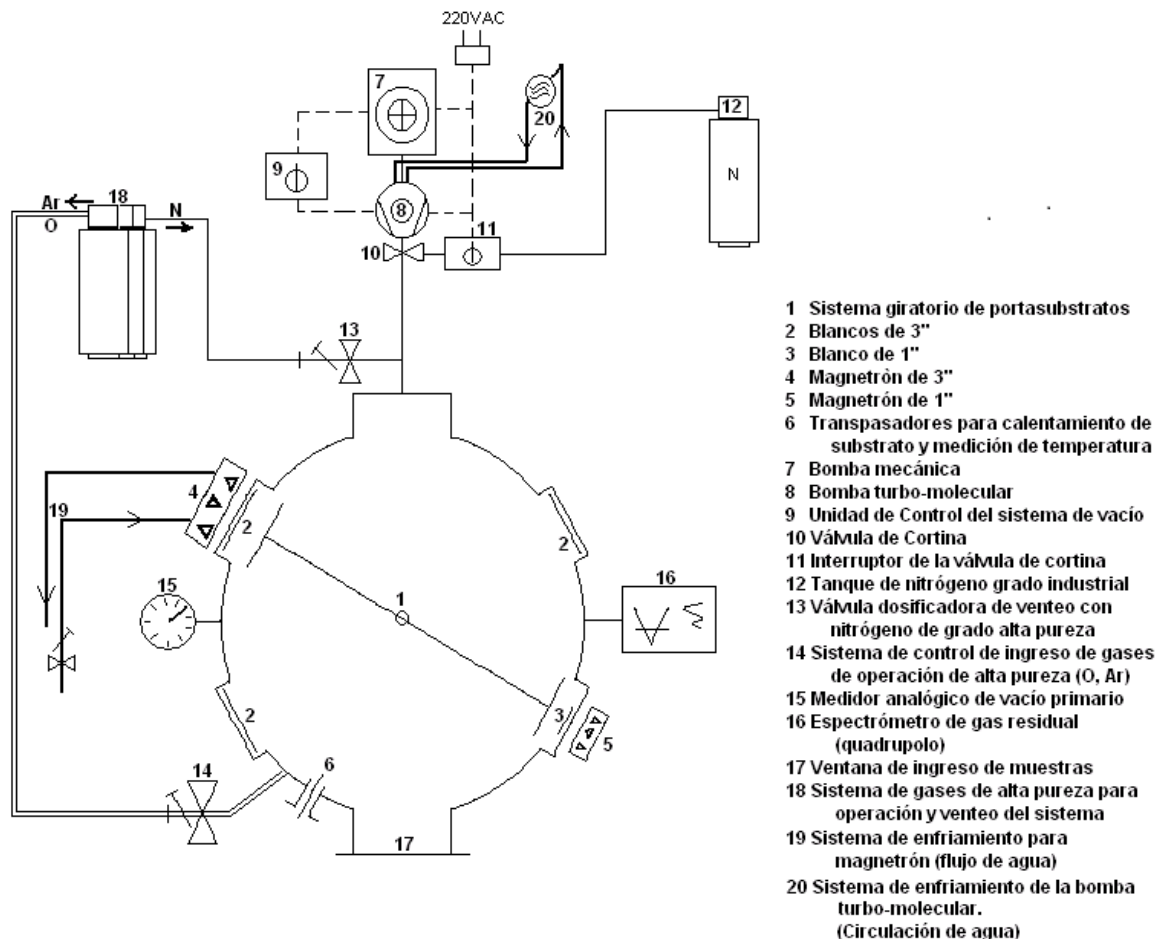


Figura 2. Diagrama a bloques del sistema de erosión catódica.

El sistema para la generación de radio frecuencia consiste en dos elementos principales, el generador de RF y el acoplador de impedancias, éste último, como su nombre lo dice, se encarga de acoplar la impedancia de la señal de salida del generador, con la impedancia de entrada del diodo receptor.

La figura 3 muestra la configuración original del sistema de erosión catódica en modo RF, donde se pueden apreciar los diferentes elementos que lo componen y la conexión que originalmente se estableció entre ellos. Las conexiones eléctricas entre el generador de RF, el acoplador de impedancias y el diodo de la cámara de vacío, se realizaron mediante cable coaxial. Tanto los sistemas electrónicos, como la cámara de vacío, están conectados a tierra física mediante una placa de cobre de 0.5x10x15cm.

Con las conexiones que se muestran en la figura 3, se produjeron los problemas que se citan a continuación: i) ruido en equipos electrónicos (controladores de masa y bomba turbomolecular), ii) señal reflejada, lo cual indica un mal acoplamiento de impedancias, y iii) sobrecalentamiento del cable coaxial entre el acoplador de impedancias y el diodo receptor.

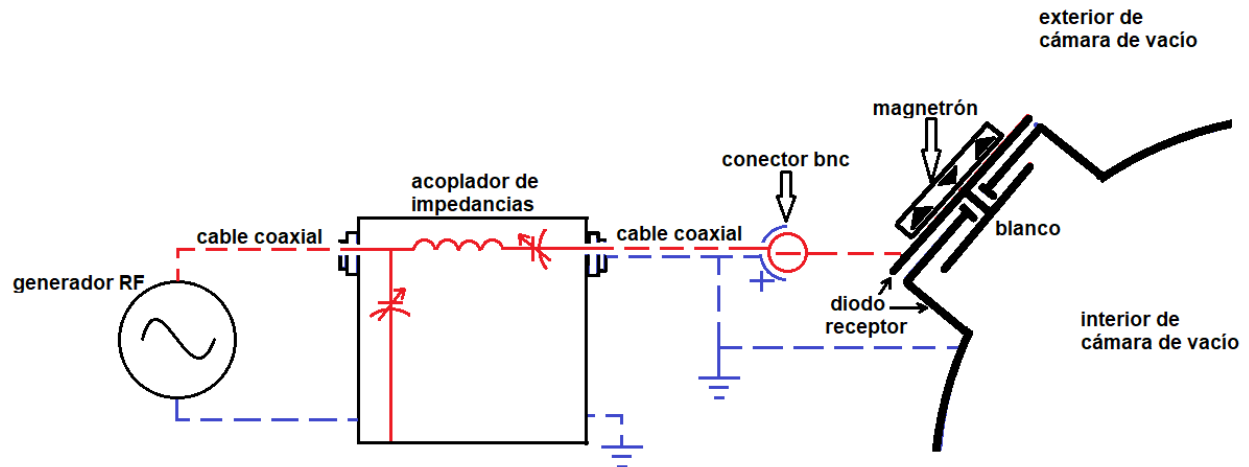


Figura 3. Conexión original del sistema.

1.1 Ruido en aparatos electrónicos.

En términos generales, se sabe que el ruido eléctrico afecta el funcionamiento de los equipos electrónicos, principalmente en los equipos de instrumentación analítica y de control. Nuestro caso particular sobre la deposición de películas delgadas por erosión catódica no es la excepción, debido a que los controladores de masa, a través de su fuente de alimentación, tienen la función de controlar el flujo de entrada de los gases involucrados en el proceso (figura 4). Los gases más comunes para el proceso de erosión catódica son argón, oxígeno y nitrógeno.



Figura 4. Controladores de masa y fuente de alimentación.

En los controladores de masa, la variación de la señal de RF provocada por el ruido, se ve reflejada en el flujo de ingreso de los gases, cambiando el valor que se predeterminó en la fuente y en ocasiones provocando el cierre total del flujo del gas hacia la cámara, lo cual repercute de manera importante en el proceso.

1.2 Señal o potencia reflejada

El funcionamiento de un generador de RF, consiste en producir una señal de RF dirigida hacia una carga, la cual debería absorberla; sin embargo, puede existir el caso en el que la señal no sea absorbida completamente y se genere una señal reflejada en la dirección opuesta, como se muestra en la figura 5. Como resultado de la suma de estas señales, se genera una onda estacionaria.

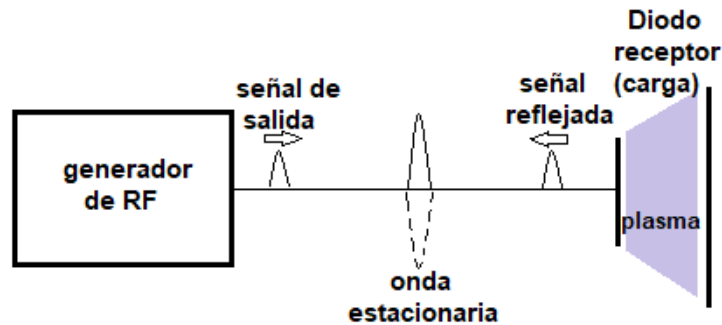


Figura 5. Descripción del mecanismo de generación de las señales de salida y reflejada.

La potencia reflejada es el resultado de un mal acoplamiento entre el generador de RF y el diodo receptor de la cámara de vacío. La presencia de potencia reflejada afecta en gran medida el proceso de erosión catódica, debido a que mientras mayor es su magnitud, mayor será el voltaje requerido para aplicar una determinada corriente en el diodo receptor. Esto puede llevar a los límites de operación del generador de RF, incluyendo un sobrecalentamiento del cable coaxial por el cual llega la señal.

Como caso particular, en la figura 6 se muestran los valores de las señales durante uno de los procesos por erosión catódica realizados en el laboratorio, en el que se puede apreciar el momento en el que las potencias de salida y reflejada, tienen magnitudes muy semejantes, esto quiere decir que sin importar la potencia de la señal de RF que sale del generador, prácticamente el 100% de dicha potencia fue reflejada, lo cual nos dio un indicativo importante de la existencia de un mal acoplamiento de impedancias. Este comportamiento no deseado, se ha estado presentando cada vez con mayor frecuencia durante los procesos utilizando la erosión catódica por RF (depósito de películas delgadas de materiales aislantes o semiconductores), situación que ha estado afectando los trabajos de investigación donde se ha requerido la deposición de estos materiales.

Por el motivo anterior, y por la dificultad de adquirir un sistema nuevo por los altos costos que este representa, se vio la necesidad de buscar una solución para minimizar o eliminar el ruido sobre la señal de RF.



Figura 6. Panel del generador de RF, donde puede verse el mal acoplamiento de las impedancias.

1.3 Sobrecalentamiento del cable coaxial

Cabe mencionar que el uso de cable coaxial entre el acoplador de impedancias y el diodo receptor, generó problemas frecuentes debido a su sobrecalentamiento, provocando deformaciones en algunas secciones a lo largo del cable, llegando en algunos casos a producir corto. En la figura 7(a), se puede ver la configuración correcta del cable coaxial, mientras que en la figura 7(b), se pueden apreciar los dos tipos de deformaciones que se presentaron, debido al efecto del calentamiento. Después de varios análisis, se puede decir que con la presencia de la deformación A, se tiene una variación en la impedancia del cable, lo cual conlleva a la aparición no deseada de la potencia reflejada durante el proceso. Por otra parte, con la presencia de la deformación B, también se tiene potencia reflejada, e incluso llega a impedir el encendido del plasma.

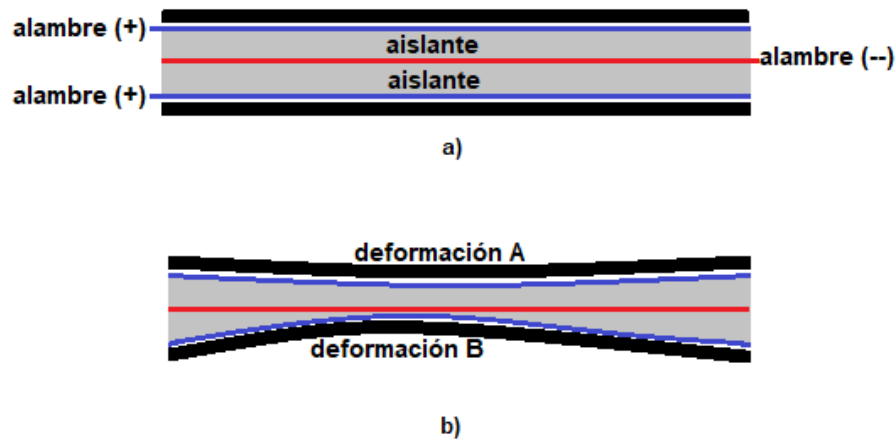


Figura 7. (a) Sección longitudinal del cable coaxial en condiciones normales. (b) Deformaciones generadas por el sobrecalentamiento del cable debido al proceso por radio frecuencia.

2 Implementaciones correctivas

Además del carácter artesanal del proceso por erosión catódica, se debe tomar en cuenta, que la cámara de vacío fue fabricada y diseñada en el taller mecánico del Centro de Instrumentos (ahora ICAT), y a lo largo del tiempo, se ha ido modificando, añadiendo algunos elementos externos, para una mejor adecuación a las necesidades propias de la investigación. En el caso del generador de RF, la forma en que se llevó a cabo la conexión al sistema de vacío, fue utilizada durante varios años, por medio del cable coaxial (figura 3). Sin embargo, el incremento en la aparición de los problemas descritos con anterioridad, generó la necesidad de buscar soluciones que permitan, no solo el buen funcionamiento del sistema de erosión catódica, sino el correcto funcionamiento de cada uno de los elementos que la componen y que alargue en la medida de lo posible, su tiempo de vida. Para lograr éste objetivo, se decidió acoplar en el sistema, un dispositivo eléctrico y un dispositivo mecánico.

2.1 Disminución de ruido

Como ya se mencionó anteriormente, uno de los problemas que ha tenido más efecto durante el proceso de erosión catódica en modo RF, ha sido el ruido generado sobre los controladores de flujo y su fuente de alimentación. Para minimizar este problema, se realizaron diversos análisis sobre la señal del ruido y se llegó a la conclusión de colocar un filtro de amortiguamiento pasivo a la salida de la señal de flujo.

En la figura 8(a) se muestra la conexión del sistema, entre el controlador de masa y la fuente de alimentación, donde se pueden observar la entrada y la salida del flujo de gas, y la conexión entre los conectores A y B. El filtro de amortiguamiento es un condensador de tantalio de 10 nF y se colocó entre las terminales 2 y 5, esto es, a la salida de la señal de flujo con referencia a tierra común de la fuente de alimentación. La figura 8(b), muestra el conector y la posición física donde se instaló el filtro de amortiguamiento.

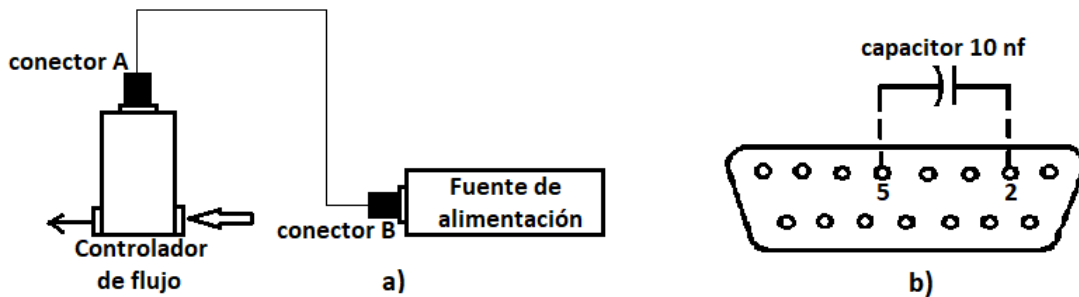


Figura 8. (a) Conexión entre el controlador de flujo y la fuente de alimentación, b) Conector con el filtro de amortiguamiento.

2.2 Señal reflejada y sobrecalentamiento del cable coaxial

Como se señaló en el capítulo anterior, es de suma importancia reducir en la medida de lo posible, la existencia de la potencia reflejada en el sistema durante el proceso. Se encontró que su origen se debía principalmente en la deformación por sobrecalentamiento del cable coaxial, que conecta el diodo receptor con el acoplador de impedancias. La estrategia que se llevó a cabo en dos partes, primero retirar y reemplazar el cable coaxial. El reemplazo se realizó colocando en su lugar un tubo de cobre de 9.5mm Ø por 75 mm de largo. El tubo de cobre tiene el objetivo de robustecer la conexión. En la figura 9(a), se puede observar el mecanismo implementado para conectar el acoplador de impedancias con el diodo receptor, el cual consistió en llevar a cabo una perforación en la pared del acoplador de impedancias, a través del cual pasa el tubo de cobre, el cual a su vez es inmovilizador y aislado eléctricamente mediante una placa de acrílico. La figura 9(b) muestra la conexión fabricada para la salida de la señal RF. En la figura 10, se muestra un esquema del acoplador de impedancias, donde se puede apreciar a detalle la posición donde fue colocada la nueva salida de la señal de RF.

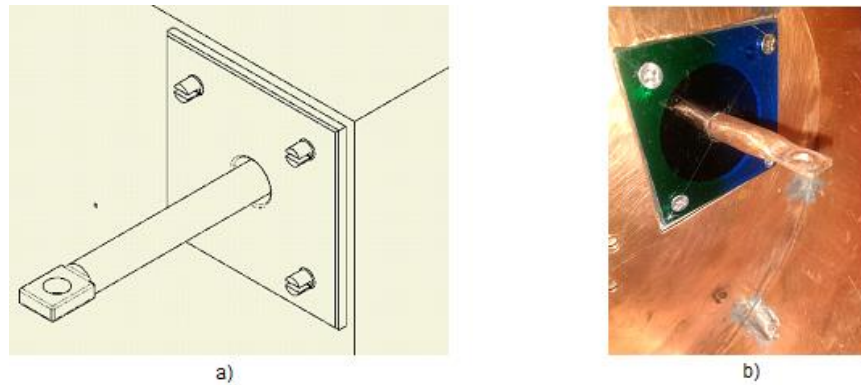


Figura 9. (a) Detalle de propuesta de la salida modificada de la señal de RF, (b) Conector fabricado.

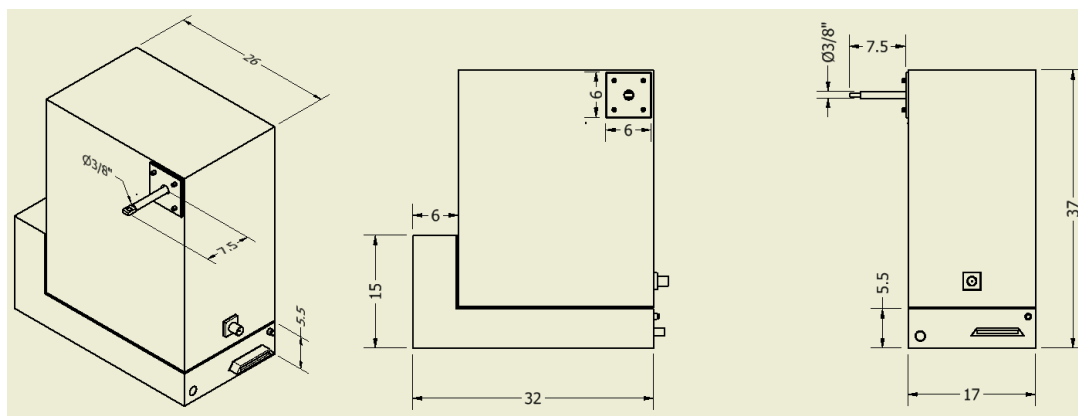


Figura 10. Acoplador de impedancias con la salida modificada de la señal de RF.

La segunda parte consistió en reducir la distancia de separación entre el acoplador de impedancias y el diodo receptor, para lo cual, se colocó una estructura de cobre, básicamente es un prisma circular hueco fabricado en lámina de cobre calibre 16, de 240 mm $\varnothing$ por 260 mm de largo, la cual tuvo dos funciones, una fue para sostener el acoplador de impedancias, y la otra para actuar como blindaje de la señal por medio de jaula de Faraday, la cual evitó las interferencias tanto eléctricas como magnéticas existentes en la zona de trabajo del laboratorio y que ayudó a confinar la señal de RF a un espacio determinado, la figura 11 muestra el diagrama esquemático de esta propuesta.

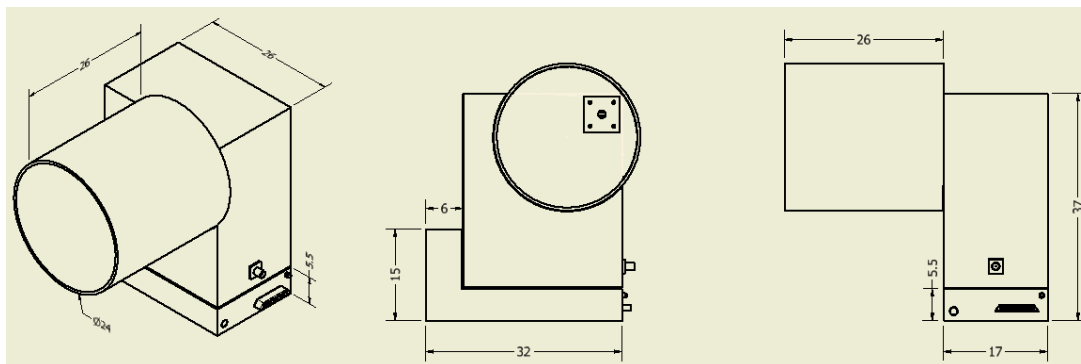


Figura 11. Acoplador de impedancias con blindaje y salida de la señal de RF.

En la figura 12(a) se muestra una simulación en AutoDesk Inventor, que describe la estructura diseñada y el conector de la señal de salida de RF. Una vez construidos los elementos diseñados se llevó a cabo su implementación y montaje, como puede verse en la figura 12(b). En la figura 12(c) se muestra la estructura montada a la cámara de vacío.

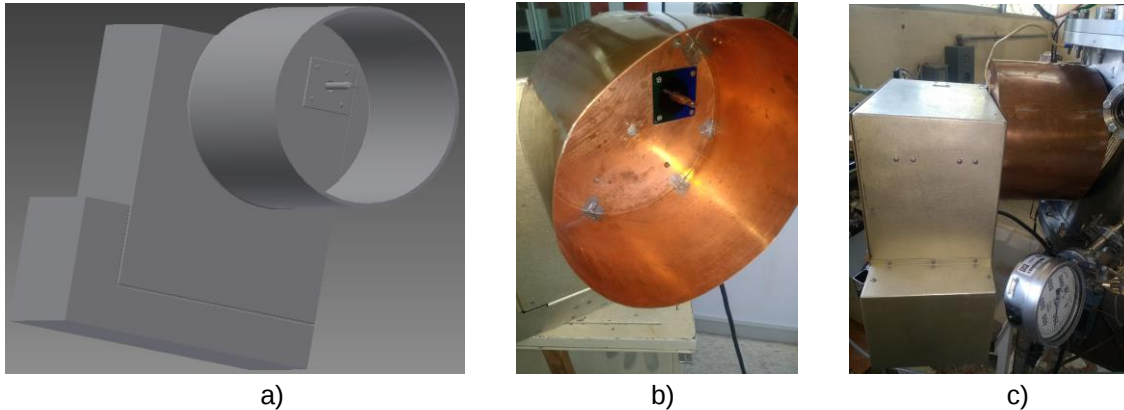


Figura 12. (a) Esquema completo de acoplador de impedancias (simulación en AutoDesk Inventor), (b) Ensamble de acoplador de impedancias y pieza de blindaje montadas en la cámara de vacío, c) Detalle de pieza de blindaje.

La figura 13 muestra un diagrama esquemático donde se puede observar la nueva configuración del sistema de generación de RF. Podemos ver que la transmisión de la señal de RF a través del tubo de cobre, y la eliminación del cable coaxial.

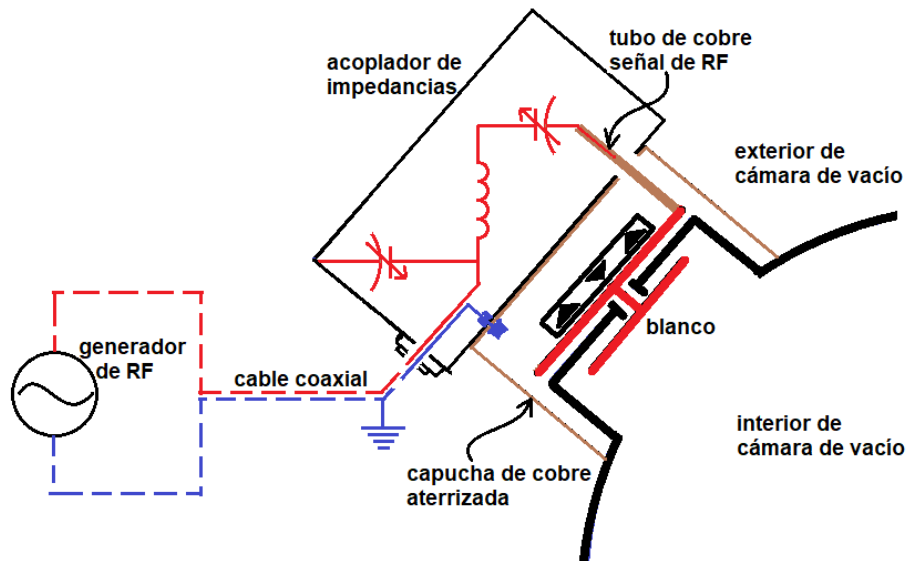


Figura 13. Propuesta de diseño para la reducción de la potencia reflejada.

3 Resultados

Con las modificaciones que le fueron realizadas al sistema de deposición de películas delgadas utilizando la técnica de erosión catódica en modo RF, podemos decir que se logró reducir de manera importante la afectación del ruido sobre la señal de RF, logrando con esto un buen y mejor control sobre los depósitos de materiales dieléctricos.

No hay que perder de vista que la justificación de este trabajo se apoya en el hecho de que desde el año pasado, empezamos a tener problemas e intentos fallidos para lograr depósitos con estos materiales y por consiguiente la afectación indirecta sobre los trabajos de investigación que están requiriendo de nuestro apoyo.

Se puede concluir que las modificaciones al sistema presentadas en este informe lograron resolver y dar solución a los problemas señalados en el párrafo anterior, dado que se han estado llevando a cabo con éxito, depósitos por erosión catódica partiendo de un blanco dieléctrico utilizando el modo RF del sistema.

Como ejemplo, podemos mencionar que se han llevado a cabo varios depósitos tanto de óxido de silicio como de óxido de zinc, entre otros, y con resultados satisfactorios.

La tabla I, muestra algunos resultados sobre la deposición de algunos materiales. Se puede apreciar que en ninguno de los tres depósitos la potencia reflejada se logró reducir a cero, sin embargo, fue suficiente para que se lleve a cabo de manera eficiente el proceso de erosión catódica.

Tabla I

	SiO₂	ZnO	Titanio
Potencia (Watts)	175	200	200
Ruido	Ausente	Ausente	Ausente
Potencia Reflejada (Watts)	11-13	13-16	6-12

Referencias Bibliográficas

Leon I. Maissel and Reinhard Glang, HandBook of Thin Film Technology, Mc Graw-Hill Book Company, 1970, pp. 16-30.

Kiyotaka Wasa, Makoto Kitabatake, Hideaki Adachi, Thin Film Materials Technology, William Andrew Publishing Springer, 2004, pp 137.