



FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

TESIS DE MAGÍSTER:

CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN EQUIPO PLASMA FOCUS DE BAJA ENERGÍA

Tesis presentada por Felix Ugarte Sejas, para optar al grado de
Magíster en Ciencias mención Física

Tutores:

Dr. Ramón A. Zárate
Dr. Héctor P. Silva

Antofagasta - 21 de noviembre de 2016

*dedicado a Dios,
familia, y un agradecimiento muy especial a mi madre,
que en la paz de Dios descansa*

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por el apoyo constante e incondicional, a mis profesores guía, Dr. Antonio Zárate Aliaga y Dr. Héctor Patricio Silva, a los profesores, compañeros y amigos del departamento de Física por sus palabras de aliento y un agradecimiento especial al Dr. Sergio Curilef.
¡Muchas gracias a todos!

RESUMEN

Se construye un equipo Plasma Focus (PF) de baja energía (720 J), llamado "Sumaj Lauray", con la intención de hacer investigación básica en plasmas y aplicaciones en ciencias de materiales. Los dispositivos PF son reconocidos generadores de plasmas de corta duración (100 ns), alta densidad ($n = 10^{24-25} m^{-3}$) y alta temperatura ($T_e = 1 keV$), muy ricos en fenómenos de plasmas fundamentales (procesos de ionización, ruptura eléctrica, interacción campo electromagnético-plasma), producción de radiación electromagnética (rayos X, UV), emisión de partículas como haces de iones, electrones, y neutrones cuando se trabaja con deuterio. Consiste básicamente en la transferencia de la energía acumulada en un banco de condensadores, a electrodos cilíndricos coaxiales al interior de una cámara con atmósfera controlada. Entre sus ventajas, se puede mencionar: su simpleza de construcción y mantenimiento, facilidad de operación, la variedad de fenómenos de plasmas que presenta, y su bajo costo. El dispositivo PF Sumaj Lauray se contruyó con las siguientes características eléctricas: capacidad nominal del banco de condensadores $C_0 = 3,6[\mu F]$, inductancia $L_0 = (104,3 \pm 0,2)[nH]$, resistencia $R_0 = (32 \pm 1)[\Omega]$, y periodo $T = (4049 \pm 2)[ns]$. Los rangos de operación del equipo son: longitud del ánodo 54 a 74[mm], y presión de la cámara de descarga 2 a 4[Torr]. Se trabajó con un voltaje de carga de 20[kV], lo que genera una corriente máxima del banco de $I_0 = (101,4 \pm 0,2)[kA]$. Se exploró como aplicación, la modificación de la superficie de obleas de silicio (100), tipo n mediante el bombardeo con iones de cobre generados en el plasma. El análisis de las muestras, sometidas a distintas técnicas de caracterización (AFM, RAMAN y XPS), evidencian el daño superficial sobre las obleas de silicio, y la presencia de cobre sobre las mismas.

SUMMARY

It tries to construct a Plasma Focus (PF) equipment with low energy (720 J), called "Sumaj Lauray", with the intention of doing the basic researches in plasmas and application on material sciences. The PF device is called as generator of plasma of short duration (100 ns), high density ($n = 10^{24-25}m^{-3}$) and high temperature ($Te = 1 keV$); very rich in fundamental plasma phenomena (ionization process, electrical rupture, electric-plasma magnetic camp), production of electromagnetic (X-rays, UV), particles emission like ions, electrons and neutrons when working with deuterium. (Suggestion: particles emission like ions and electrons, and also neutrons when working with deuterium.) Basically, it consists in the transfer of accumulated energy of a condensing bank, to coaxial cylindrical electrodes that are in the interior of a camera under controlled atmosphere. Among its advantages, it possible to mention the simplicity of construction and maintenance, operation facility, the variety of plasma phenomena there is, and its low cost. The Sumaj Lauray PF device has been cosntructed with the following electrical characteristics: nominal capacity of condensing bank $C_0 = 3,6[\mu F]$, inductance $L_0 = (104,3 \pm 0,2)[nH]$, resistance $R_0 = (32 \pm 1)[\Omega]$, and period $T = (4049 \pm 2)[ns]$. The operation ranks of the equipment are: longitude of anode 54 to 74[mm], and camera pressure of discharge 2 to 4[Torr]. It works with 20[kV] voltage charge, which generates maximum current of the bank of $I_0 = (101,4 \pm 0,2)[kA]$. It has been explored like application, the surface modification of silicon wafers (100) type n by pumping of the copper ions generated in the plasma. The analysis of the samples subject to various techniques of characterization (AFM, RAMAN and XPS), that shows its superficial damage in the silicon wafers, and the presence of copper in it.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	V
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	1
1. Introducción	3
1.1. El Plasma Focus tipo Mather	5
1.1.1. Fases de la descarga plasma foco	6
1.1.2. Modelo de Sing Lee	8
1.1.3. Generación de haces de iones y electrones	10
1.2. Revisión bibliográfica	11
1.3. Objetivo de la Tesis	13
1.3.1. Objetivo General	13
1.3.2. Objetivos Específicos	13
1.4. Descripción de la Tesis	14
2. Equipamiento experimental del PF Sumaj Lauray y diagnósticos	15
2.1. Descripción del PF Sumaj Lauray	15
2.1.1. Caracterización eléctrica del PF Sumaj Lauray	18
2.2. Diagnósticos eléctricos de la descarga Plasma Focus	19
2.2.1. Divisor resistivo	21
2.2.2. Calibración del divisor de voltaje de descarga PF	22
2.2.3. Bobina de Rogowski, calibración y obtención de corriente de descarga PF	24
2.2.4. Aplicación PF	28
2.3. Condiciones de operación del PF: caracterización eléctrica e implantación de iones	30
2.4. Técnicas de caracterización de muestras	30

2.4.1.	Microscopía de Fuerza Atómica AFM	30
2.4.2.	Espectroscopía de fotoelectrones (XPS, según siglas en inglés)	31
2.4.3.	Técnica de caracterización RAMAN	32
3.	Resultados y análisis	35
3.1.	Caracterización de las muestras	41
3.1.1.	Técnica de caracterización AFM	41
3.1.2.	Técnica de caracterización RAMAN	46
3.1.3.	Técnica de caracterización XPS	47
4.	Discusión	51
5.	Conclusión	53

Índice de figuras

1.1.	Esquema de los distintos Equipos Plasma Focus	4
1.2.	Plasma Focus tipo Mather.	5
1.3.	Circuito y dinámica del plasma en un dispositivo PF tipo Mather [4].	7
1.4.	Esquema PF para el modelo de Sing Lee.	9
1.5.	Producción de iones y electrones durante el colapso de la columna de plasma.	11
2.1.	Sistema Plasma Focus SL.	16
2.2.	Sistema Spark Gap.	17
2.3.	Circuito eléctrico para determinar los parámetros de caracterización del equipo SL, y señal de voltaje del electrodo central.	18
2.4.	Diagrama de los diagnósticos y señales típicas producidas durante la descarga Plasma Foco.	20
2.5.	Circuito eléctrico del Divisor Resistivo.	22
2.6.	Medición voltaje de descarga PF.	23
2.7.	Relación de ajuste V_{P6015A} vs V	23
2.8.	Bobina de Rogowski y voltaje inducido.	25
2.9.	Corriente de descarga PF.	26
2.10.	Ajuste V_{P6015A} vs dI/dt	27
2.11.	Señales de descarga PF calibradas.	28
2.12.	Preparación del equipo SL, para su aplicación mediante el bombardeo iónico a obleas de silicio.	29
2.13.	Microscopio de Fuerza Atómica.	31
2.14.	Espectroscopía de fotoelectrones excitados por $R - X$	32
2.15.	Dispersión RAMAN.	33
2.16.	Espectroscopía RAMAN y sus modos de dispersión.	33
3.1.	Equipo Sumaj Lauray SL implementado.	35
3.2.	Tiempo dip (ns) Vs. presión de la cámara de descarga ($Torr$).	36
3.3.	Voltaje pinch (kV) Vs. Presión de la cámara de descarga ($Torr$).	37

3.4. Voltaje pinch (kV) Vs. Longitud del electrodo (mm).	37
3.5. Tiempo $t_{dip}(ns)$ Vs. longitud del electrodo $L(mm)$	38
3.6. Comparación de tiempo de tránsito a lo largo del ánodo versus longitud del ánodo, experimental y modelo teórico de Sing Lee.	39
3.7. Comparación de tiempo de tránsito a lo lardo del ánodo versus densidad de gas (H_2) en la cámara de descarga, experimental y modelo teórico de Sing Lee.	40
3.8. Aplicación del modelo teórico de Sing Lee, velocidad axial de la lámina de corriente.	41
3.9. Topografía 3D, superficies de obleas de silicio.	42
3.10. Fotografía de la oblea de silicio con 30 disparos.	43
3.11. Histograma de imágenes AFM. de obleas de silicio.	43
3.12. Perfil de altura de obleas de silicio.	44
3.13. Espectro RAMAN de la oblea de silicio sometida al bombardeo de iones de cobre, 5 y 10 disparos, con diferentes tiempos de oxidación.	46
3.14. Espectro XPS de la muestra con 5 disparos.	48
3.15. Espectro XPS de la muestra con 10 disparos.	49

Índice de cuadros

2.1. Parámetros de calibración de Plasma Focus.	19
2.2. Tabla de ajuste de los valores de $VP6015A$ vs V	24
2.3. Parámetros de calibración bobina de Rogowski.	26
2.4. Tabla de la serie de bombardeos iónicos en obleas de silicio.	29
3.1. Parámetros de funcionamiento del dispositivo PF.	35
3.2. Parámetros de caracterización de las obleas de silicio extraídas a partir de imagen AFM.	44
3.3. Voltajes <i>pinch</i> , para $Si - 2$ y $Si - 17$	47
3.4. Cantidad porcentual de $Cu2p3$, $C1s$ y $O1s$ presente en las obleas de silicio con 5 y 10 disparos.	50

Capítulo 1

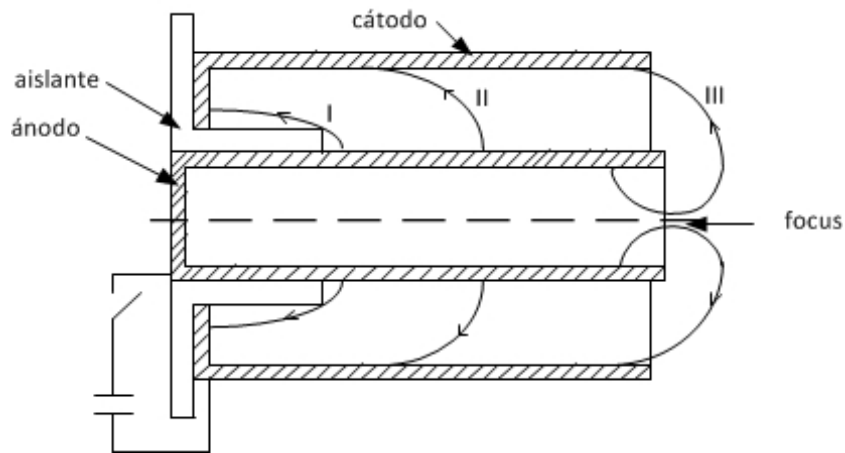
Introducción

A fines de la década de los 60 se desarrolló un nuevo dispositivo para la generación de plasmas magnetizados y densos, llamado Plasma Focus (PF). Esta máquina, operada con algunos *Torr* de deuterio, producía un promedio de 10^{10} neutrones por descarga (lo que representa tres órdenes de magnitud más que el producido hasta entonces por los Z-pinch convencionales de similar energía). Esto, unido al hecho que el plasma producido tenía un alto valor de nT (con n densidad de electrones y T tiempo de confinamiento), despertó gran interés entre los especialistas que veían en el dispositivo una notable ventaja para estudiar el reactor de fusión nuclear.

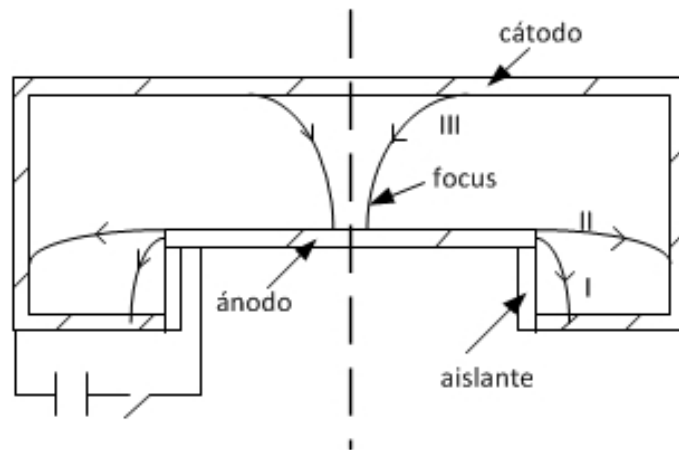
En forma casi simultánea e independiente fueron desarrollados dos diseños de Plasma Focus, uno por el grupo dirigido por N. Filippov en la ex Unión Soviética (Moscú) y otro J. Mather en Estados Unidos (Los Alamos)[1], obteniéndose parámetros de plasma similares en los dos equipos al ser operados con energías comparables. Las dos versiones del dispositivo PF se identifican por el nombre de sus respectivos descubridores, y se diferencian entre sí principalmente en su geometría[1]. Las máquinas operan con descargas eléctricas pulsadas realizadas entre electrodos cilíndricos coaxiales en una atmósfera gaseosa, y tienen de tres a cuatro etapas: ruptura y formación inicial de la descarga a través del aislador, aceleración axial de la lámina de corriente (solo en Plasma Foco tipo Mather), compresión radial de la lámina de corriente y etapa de plasma denso y foco[1]. En esta última se forma una pequeña columna de plasma (20 mm de largo, 1 mm de diámetro) de corta vida (aprox. 100ns), cuya disgregación producida por presión electromagnética y turbulencias lleva a la generación de potentes haces de electrones e iones, emisión de rayos-X, protones y neutrones de fusión cuando se trabaja con deuterio. En la figura 1.1 se observa las diferencias geométricas entre los electrodos, para los dos tipos de PF. El Plasma Focus tipo Mather, experimenta el desplazamiento laminar de corriente, no así el Plasma Focus tipo Filippov. En el

PF tipo Mather, la aceleración de la lámina de corriente es axial y paralela a los electrodos, formándose una columna de plasma al extremo superior del ánodo por compresión electromagnética, mientras que en el tipo Filippov, se produce directamente la compresión después de la descarga.

El equipo diseñado y construido en esta tesis es del tipo Mather, y una de sus aplicaciones consistió en la modificación de superficies de obleas de silicio y celdas solares.



(a) Plasma Focus tipo Mather.



(b) Plasma Focus tipo Filippov.

Figura 1.1: Esquema de los distintos Equipos Plasma Focus

1.1. El Plasma Focus tipo Mather

El dispositivo Plasma Focus consiste en una máquina que produce en su etapa final, por aceleración y compresión electromagnética, una columna de plasma de corta duración ($10\text{ns} - 100\text{ns}$) que es muy caliente (alrededor de 1keV) y suficientemente denso (alrededor de 10^{24-25}m^{-3})[2], donde se genera la emisión de $R - X$ blandos y duros, haces de iones y electrones, y neutrones cuando se usa deuterio. El equipo está compuesto de dos electrodos cilíndricos coaxiales, separados en la base por un aislante cilíndrico de menor longitud. Generalmente el electrodo interno es el ánodo y el electrodo externo el cátodo. La fuente de energía es un banco de condensadores (C_0), cargado a un voltaje V_0 mediante una fuente de alto voltaje. El banco de condensadores se conecta directamente a los electrodos a través de un interruptor de alto voltaje (Spark Gap). El circuito eléctrico, excluidos los electrodos, tiene una inductancia total L_0 , en la siguiente figura se presenta el sistema Plasma Focus, y su respectivo circuito eléctrico, figura (1.2):

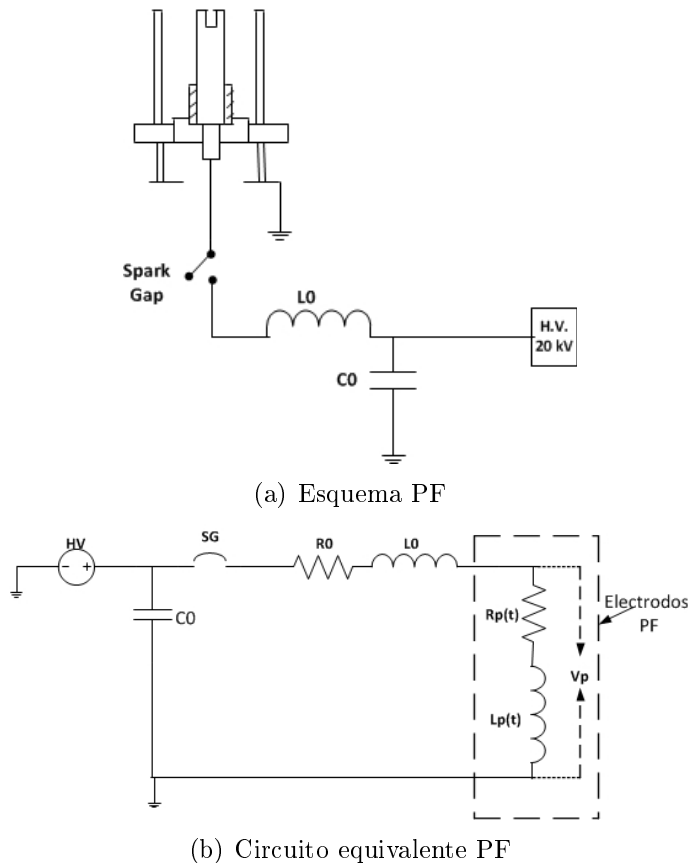


Figura 1.2: Plasma Focus tipo Mather.

El núcleo central del sistema Plasma Focus tipo Mather, como ya se dijo antes, está constituido del sistema de distribución de los electrodos, donde se produce el plasma, tal como se observa en el inciso *a*) de la figura (1.2). La efectividad del *pinch* dependerá, de la simetría de distribución de los electrodos, así como de la presión de gas en la cámara de descarga, voltaje de descarga y longitud de los electrodos.

El circuito eléctrico equivalente del sistema PF, está constituido básicamente de los siguientes elementos: una fuente de alto voltaje, un banco de capacitores, un interruptor (Spark Gap), una resistencia R_0 , una inductancia L_0 , una resistencia variable del plasma $R_p(t)$, y una inductancia variable del plasma $L_p(t)$.

1.1.1. Fases de la descarga plasma foco

Durante el proceso de descarga se distinguen 4 etapas características. A continuación se hace una breve descripción de cada una de estas etapas.

1. Ruptura y descarga superficial

Al cerrar el swich (Spark Gap) del circuito eléctrico de la figura (1.3), se provee una diferencia de potencial a los electrodos, y para condiciones apropiadas de presión y temperatura se producirá una descarga a través del aislador, desde el electrodo interior al electrodo exterior. La fuerza electromagnética ejercida sobre la lámina de corriente axialmente simétrica ($\vec{J} \times \vec{B}$) apunta en dirección positiva y paralela a los electrodos, si la corriente fluye del electrodo central hacia el electrodo externo, esta fuerza separa la corriente del aislador dando origen a una lámina de corriente, cuyo extremo se mueve hasta alcanzar a formar un cilindro de plasma en la parte superior del ánodo, tal como se observa en la figura (1.3).

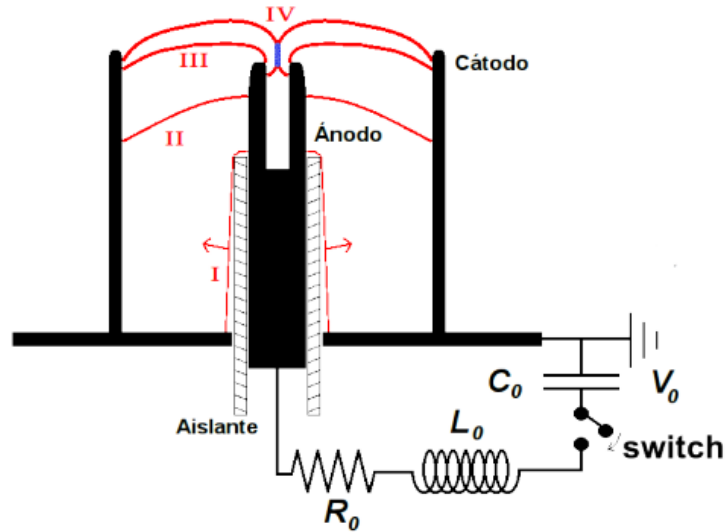


Figura 1.3: Circuito y dinámica del plasma en un dispositivo PF tipo Mather [4].

2. Fase de aceleración axial

Cuando la separación corriente–aislador se completa, la corriente fluye simétricamente desde el electrodo interior al electrodo exterior formando una lámina radialmente simétrica, y levemente inclinada en la dirección Z con su máximo apegado al electrodo central (debido a la dependencia radial de \vec{B}_θ y \vec{J}_z). En esta posición la fuerza de Lorentz, que ahora apunta en la dirección axial (Z), acelerará la lámina alejándola de la base del cañon (1.3). Durante su desplazamiento la lámina irá barriendo el gas que encuentre en su camino y a la vez ionizándolo.

3. Fase de colapso radial

Cuando la lámina de corriente alcanza el extremo superior del electrodo central, la porción de lámina que se ha ido desplazando pegado al mismo empezará a moverse en dirección radial entrante sobre la boca del electrodo. El otro extremo de la lámina seguirá en su movimiento axial pegado al electrodo exterior.

4. Fase de plasma denso y foco

En esta fase, una columna de plasma denso se forma sobre el eje del tubo del foco, en la boca del electrodo central. Hacia el final aparece

una inestabilidad que rompe la columna y muy rápidamente se forma una fase de gran diámetro.

La formación de la columna de plasma denso, sucede por la presión electromagnética. Esta presión al final produce una ruptura de la columna del plasma (*pinch*). Matemáticamente la diferencia de potencial entre la base del electrodo central y el extremo superior de la columna denso de plasma, justamente antes de que se produzca la ruptura de la columna, puede expresarse como:

$$\begin{aligned} V &= \frac{d(LI)}{dt} + RI \\ V &= L\frac{dI}{dt} + I\frac{dL}{dt} + RI \end{aligned} \tag{1.1}$$

Siendo $L = L_c + L_p$, con L_c la inductancia del electrodo central, y L_p la inductancia del plasma; del mismo modo $R = R_c + R_p$, siendo L_p y R_p variables en el tiempo. Generalmente R es muy pequeña, y para casos prácticos se puede despreciar. Durante el colapso radial dL_p/dt es muy grande, entonces:

$V = L\frac{dI}{dt} + I\frac{dL_p}{dt}$, generalmente se hace coincidir I_{max} con el inicio de colapso, entonces $dI/dt \rightarrow 0$ y $V = IdL_p/dt$.

1.1.2. Modelo de Sing Lee

El modelo teórico de Sing Lee para el estudio de la descarga PF, hace varias aproximaciones, toma la lámina de plasma moviéndose en la dirección axial y radial. Para la dirección axial se considera un cilindro hueco formado por la lámina, el cual barre un volumen de gas igual al formado por sí mismo, ver figura (1.4). Entonces para la fase axial, utilizando el modelo de Snow-Plow, se tiene las siguientes ecuaciones [3]:

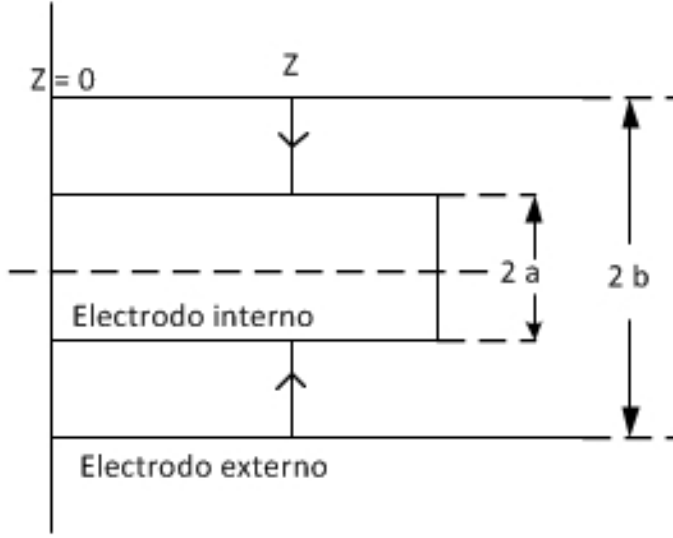


Figura 1.4: Esquema PF para el modelo de Sing Lee.

La tasa de cambio del momentum en la lámina de corriente, en la posición z , es:

$$\frac{d}{dt} \left([\rho_0 \pi (b^2 - a^2) z] f_m \frac{dz}{dt} \right) = \rho_0 \pi (c^2 - 1) a^2 f_m \frac{d}{dt} \left(z \frac{dz}{dt} \right) \quad (1.2)$$

La fuerza magnética sobre la lámina de corriente es:

$$\int_a^b \left[\frac{\left(\frac{\mu I f_c}{2\pi r} \right)^2}{2\mu} \right] 2\pi r dr = \frac{\mu f_c^2}{4\pi} \ln(c) I^2 \quad (1.3)$$

Donde f_m es la fracción de masa barrida por el tubo en la dirección axial; f_c es la fracción de corriente que fluye en el pistón (o lámina de corriente); $c = b/a =$ radio cátodo/radio del ánodo; $\rho_0 =$ densidad del ambiente; $I =$ corriente de corriente variando en el tiempo; $\mu_0 =$ permeabilidad.

Tomando las ecuaciones, 1.2 y 1.3, se escribe la ecuación de movimiento, que después de trabajar un poco, se llega a la siguiente ecuación.

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{\left[\frac{f_c^2 \mu \ln c}{f_m 4\pi^2 \rho_0 (c^2 - 1)} \left(\frac{I}{a} \right)^2 \right]}{z} \quad (1.4)$$

Por otro lado, para el caso de este proyecto, el circuito a resolver es el RCL, si se ignora la resistencia del plasma $R_p(t)$ por ser muy pequeña figura (1.2), la ecuación del circuito es:

$$\frac{d}{dt} [(L_0 + L_p f_c) I] + R_0 I = V_0 - \int \frac{I dt}{C_0} \quad (1.5)$$

Las ecuaciones (1.4) y (1.5) son las ecuaciones de generación del modelo de Sing Lee. Por ejemplo, para hallar el tiempo de transición axial, y velocidad de la lámina de corriente a través del electrodo central, se resuelve la ecuación 1.4 en las variables t y z , dando como resultado:

$$t_a = \left[\frac{4\pi^2(c^2 - 1)}{\mu l n c} \right]^{1/2} \frac{f_m^{1/2} z_0 \rho_0^{1/2}}{\left(\frac{I_0}{a} \right)} \quad (1.6)$$

y con $V_a = z_0/t_a$

$$V_a = \left[\frac{\mu l n c}{4\pi^2(c^2 - 1)} \right]^{1/2} \frac{I_0/a}{\sqrt{f_m} \sqrt{\rho}} \quad (1.7)$$

Donde, I_0 y z_0 son la corriente máxima y longitud de electrodo central(ánodo) respectivamente. Para mayores detalles del desarrollo del modelo de Sing Lee, se tiene la referencia [4].

1.1.3. Generación de haces de iones y electrones

Los potenciales de aceleración son proporcionales al sobre voltaje del pinch (V_{pinch}).

Los haces de electrones que chocan contra el ánodo, arrancan material del electrodo (Cu) que es incorporado al plasma, entonces los iones generados son una mezcla de gas (H^+) y del material del ánodo (Cu^{+m}).

Cuando la lámina de corriente alcanza la parte posterior del electrodo interno, donde los campos magnéticos producidos por las corrientes de arrastre, tuercen la columna de plasma hasta convertirla en una pequeña bola densa llamada plasmoide, con temperatura de algunos keV, los campos magnéticos cambiantes colapsan muy rápidamente, dejando como resultado un campo eléctrico inducido, que hace que un haz de electrones fluya en una dirección y un haz de iones-átomos que han perdido electrones en otra dirección, vea la figura (1.5).

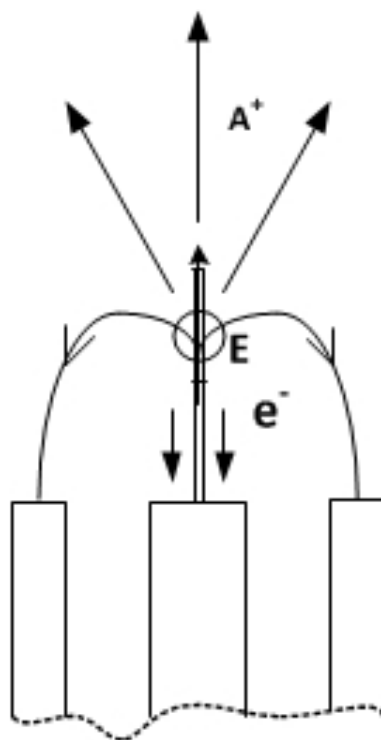


Figura 1.5: Producción de iones y electrones durante el colapso de la columna de plasma.

Los electrones durante la duración del plasmóide (10 ns), transfieren energía a los iones haciéndoles aún más energéticos, que posteriormente pueden ser acelerados o simplemente aprovechados en esas condiciones.

$e + A \rightarrow A^+ + 2e$ y $h\nu + A \rightarrow A^+ + e$, mientras que las recombinaciones corresponden a los procesos inversos; recombinación a tres cuerpos $A^+ + 2e \rightarrow e + A$ y recombinación radiativa $A^+ + e \rightarrow h\nu + A$ [5].

Para el caso de este proyecto los iones se aprovechan para hacer el bombardeo iónico sobre obleas de silicio. Los procesos de ionización más importantes son los debidos al impacto electrónico e ionización radiativa,

1.2. Revisión bibliográfica

La implementación de un equipo Plasma Focus, nace de la necesidad de contar con una fuente de radiaciones múltiples (R-X, Neutrones, Partículas Alpha, Iones metálicos, etc.), este mismo fue la razón de su implementación en Kansas State University de los Estados Unidos[6], de un Plasma Focus de energía $2,5kJ$, capacitancia $12,5\mu F$ e inductancia $125nH$, con el nombre

de Kansas State University Dense Plasma Focus (KSU-DPF), este equipo fué utilizado para diversos estudios, entre ellos, cálculo de los parámetros estáticos, L_0 , R_0 y C_0 mediante un examen de cortocircuito, estudio del rendimiento de neutrones con el aumento de la presión, y ajuste de la corriente de descarga experimental a la corriente de descarga computacional (Modelo de Sing Lee).

El estudio de la descarga Plasma Focus, últimamente ha venido despertando el interés de muchos profesionales, tanto físicos como ingenieros, debido a las diversas ventajas que presenta el sistema Plasma Focus, tanto en su construcción, manipulación y producción de radiaciones de distinta naturaleza, como ya se mencionó anteriormente. Los estudios realizados con respecto a la operación y estudio de las radiaciones producidas por el PF, principalmente están centrados en la caracterización y operación del equipo Plasma Focus, descarga Plasma Focus, proceso de ionización en la cámara de descarga y partículas producidas durante la formación del pinch.

Con respecto a la descarga Plasma Focus, se puede mencionar, el estudio de la dinámica de la lámina de corriente axial de un equipo Plasma Focus de $2,5kJ$, bajo un régimen de alta presión $\geq 30 \text{ mbar}$ [7]. El test se realiza usando distintos tipos de gases, empezando con los mas livianos (hidrógeno) hasta los mas pesados (argon), se encuentra que la desviación de los parámetros estáticos es inversamente proporcional a la masa molecular de los gases a una cierta presión. También se utiliza el modelo de Snowplot para hallar los valores promedios de la velocidad en gases pesados como el argon ($0,8 \text{ cm}/\mu\text{s}$), mientras que para el hidrógeno resulta $1,6 \text{ cm}/\mu\text{s}$ [8].

También se resalta, el estudio de la variación de emisión de radiación con presión de gas Argon en un Plasma Focus ($2,2 \text{ kJ}$, 12 kV), con ánodo hueco, en este trabajo se utilizaron diodo detectores para caracterizar la energía del haz de radiación, se miden señales de R-X con un arreglo de diodo-detectores PIN. La emisión de R-X producida por la descarga Plasma Focus a varias presiones, son investigadas y comparadas, se encuentra que a presiones mayores a $1,5 \text{ mbar}$ se obtiene la salida de altas concentraciones de R-X y muy concistentes, en el pick de la corriente de descarga. Se obtiene un aumento remarcable de casi 5 veces el promedio de R-X a una presión óptima de $1,7 \text{ mbar}$ [9].

En lo que respecta a la implantación de iones, del mismo modo se tienen muchos trabajos, debido a que presenta un rango amplio de aplicaciones, principalmente en el dopaje de semiconductores (silicio) con iones metálicos (Cu , Ag), entre los que se pueden resaltar, una de las referencias mas recientes en la implantación de iones para celdas solares fué en 1964 por King y Burrill "Ion Implantation for silicon solar cell" [9], quienes usaron un acelerador electrostático de Van der Graaff para acelerar iones de boro o fósforo

desde una fuente de iones microonda. Las fuentes de iones desde una descarga de plasma se hicieron comunes en los años 70 y 80, se utilizaron una variedad de gases dopantes, como ser, trifluoruro de cobre (BF_3), hidruro de boro (B_2H_6), fosfano (PH_3) y pentafluoruro de fósforo (PF_5), uno de los mas avanzados y ambiciosos implementaciones de implantación para celdas solares fué por la corporación Hoxan en Japon en 1982, donde utilizarón 4 obleas redondas y gas BF_3 (40 keV)[9].

También se hicieron trabajos en el pais, de los que se puede resaltar, trabajo de investigación, estudio de la emisión del haz de iones desde un dispositivo Plasma de energía pulsada, realizada en la Pontificia Universidad Católica de Chile (2014)[10].

1.3. Objetivo de la Tesis

Los equipos Plasma Focus han sido utilizados extensamente en laboratorios de física del plasma para estudio de fenómenos fundamentales de plasma, desarrollo de diagnósticos, formación de capital humano, y últimamente en aplicaciones. Estos dispositivos presentan una rica fenomenología de plasmas, son sencillos de operar y de bajo costo. Dentro de los fenómenos que se presentan en un plasma generado por un dispositivo PF se encuentran: procesos de ionización de gases, evolución de la lámina de corriente a velocidades supersónicas, generación de pinch con emisión de haces de iones y electrones, generación de radiación UV y rayos X, entre otras. En esta tesis se aplicará el plasma (iones y nube de plasma) para modificar las propiedades ópticas y morfológicas de obleas de silicio(100) tipo n.

1.3.1. Objetivo General

Construir y caracterizar un equipo Plasma Focus de baja energía, y realizar pruebas de implantación de iones en obleas de silicio(100) tipo n.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Construir un dispositivo Plasma Focus (PF) de baja energía (menor a 1 kJ), y determinar los parámetros eléctricos característicos del mismo.
2. Caracterizar las condiciones de operación del plasma, generado con el dispositivo PF, estudiando su comportamiento eléctrico y cinemático para diferentes valores de presión de hidrógeno y largos de electrodos.

3. Fabricar muestras, en base a obleas de silicio, tratadas con el plasma generado en la descarga PF.
4. Entrenar en las técnicas de caracterización de superficies (AFM, RAMAN y XPS), aplicándolas a las obleas de silicio tratadas.
5. Caracterizar las muestras modificadas, para estudiar la superficie de las obleas de silicio o la posible implantación de iones.

1.4. Descripción de la Tesis

Este trabajo se compone de dos partes: la primera parte está referida a la construcción y caracterización del equipo Plasma Focus SL (Sumaj Lauray); la segunda parte a la caracterización de las muestras, mediante el uso de las técnicas de caracterización AFM, RAMAN y XPS.

Para hacer efectiva la implementación del equipo, se inicia diseñando algunas piezas de todo el conjunto Plasma Focus, como es la base de la cámara de descarga, cámara de Spark Gap, electrodos, conexionado eléctrico de todo el sistema Plasma Focus y jaula de Faraday. Terminado el diseño se procede a la construcción de las piezas y finalmente se realiza el montaje del equipo. Teniendo el equipo montado, se procede con la determinación de los parámetros característicos del equipo PF (inductancia, resistencia, capacitancia, periodo) y se prepara para el bombardeo iónico, también se encuentran: la longitud óptima del electrodo central, presión de trabajo del gas y el voltaje máximo de descarga (pinch).

En la segunda parte de este proyecto de tesis, se verifica la aplicabilidad del equipo PF, a través de cambios morfológicos en la superficie de obleas de silicio, como consecuencia del bombardeo iónico. Se inicia con el montaje de un soporte de muestras en el interior de la cámara de descarga, se preparan las muestras, y posteriormente se procede con el bombardeo.

Capítulo 2

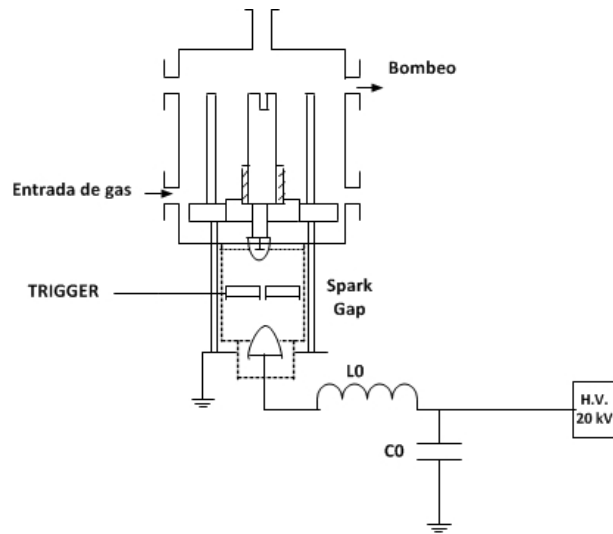
Equipamiento experimental del PF Sumaj Lauray y diagnósticos

Los detalles de la construcción del equipo no se desglosan, puesto que el presente proyecto de tesis, se centra más en la caracterización, diagnósticos, y puesta a punto del equipo para su posterior aplicación.

Este capítulo está organizado en 4 secciones: Descripción del Plasma Focus SL, Diagnósticos eléctricos de la descarga PF, Condiciones de operación del PF, y Técnicas de caracterización de muestras; en cada una de las secciones se explica el procedimiento y se muestra los parámetros característicos del PF. Los diagnósticos están orientados principalmente a encontrar los parámetros eléctricos básicos de la descarga (voltaje, corriente), y los parámetros de operación del equipo SL.

2.1. Descripción del PF Sumaj Lauray

El equipo PF Sumaj Lauray de baja energía ($0,7 \text{ kJ}$) construido en el departamento de física de la Universidad de Antofagasta, se compone básicamente de lo siguiente: banco de 6 condensadores conectados en paralelo con una capacitancia total de $C_0 = 3,6 \mu\text{F}$, una fuente de alto voltaje ($0 - 30 \text{ kV}$), un interruptor de alto voltaje *SG* (Spark-Gap), una cámara de vacío que contiene los electrodos de descarga (ánodo y cátodo), y un sistema para hacer vacío y entrada de gases. En la figura (2.1), se presenta el equipo PF construido juntamente con su respectivo circuito eléctrico.



(a) Esquema del sistema PF Sumaj Lauray implementado.

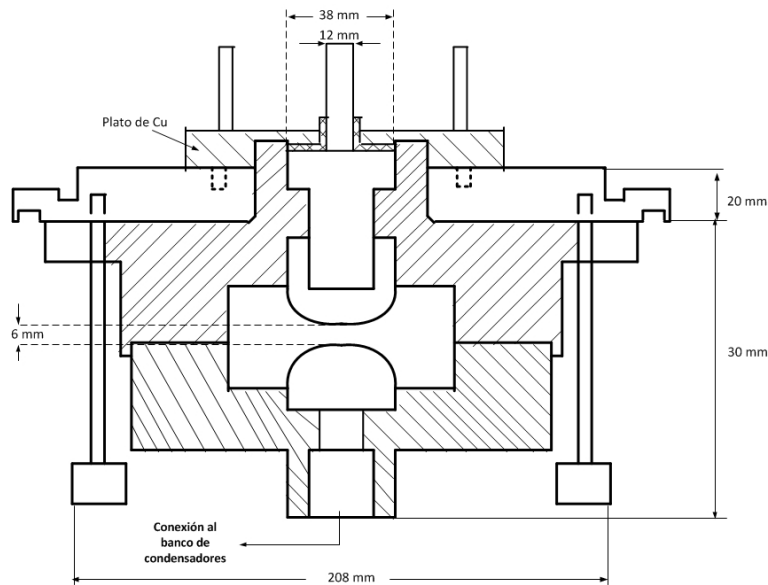


(b) Equipo SL construido.

Figura 2.1: Sistema Plasma Focus SL.

Una de las componentes mas importantes del equipo PF construido, es el interruptor spark gap, que es el que transmite la energía del banco de condensadores a los electrodos, y es crítico su comportamiento para la eficiencia

de la descarga entre los electrodos. El spark gap se compone de una pequeña cámara de gas (nitrógeno), y dos electrodos de cobre semiesféricos separados 6 mm , y un disco metálico con un sacado circular central que actúa como trigger. El borne inferior va conectada directamente a la fuente de alto voltaje, y el borne superior a la base del electrodo central (ánodo), el conjunto del spark gap construido se muestra en la figura (2.2).



(a) Dimensiones del Spark Gap, vista transversal.



(b) Spark Gap construido.

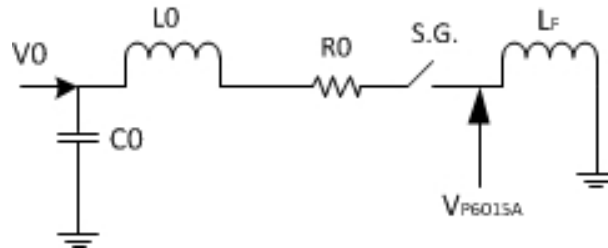
Figura 2.2: Sistema Spark Gap.

Entre los bornes superior e inferior del spark gap, se sitúa una lámina metálica con un sacado circular. El objetivo de la lámina es dividir en partes iguales la diferencia de potencial entre los bornes.

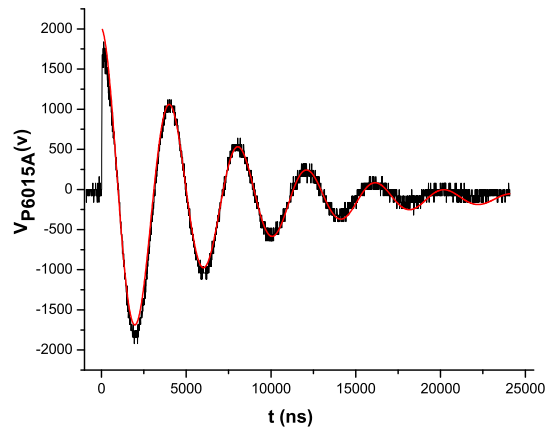
El spark gap opera con nitrógeno a presiones en el rango de $1 - 2\text{ atm}$ y en rango de voltaje de $10 - 30\text{ kV}$.

2.1.1. Caracterización eléctrica del PF Sumaj Lauray

Terminada la construcción del PF Sumaj Lauray, se procede con la caracterización eléctrica asumiendo que el sistema eléctrico del equipo, se comporta como un circuito RLC , figura (2.3), con los electrodos de la cámara principal en corto-circuito a nivel de la base de los electrodos. La caracterización del equipo PF, se realiza a partir de los parámetros estáticos que lo describen, estos son: periodo (T), constante de amortiguación (γ), inductancia (L_0), y resistencia (R_0). Las condiciones de caracterización son: cámara principal expuesta al aire libre, gas en la cámara de spark gap (nitrógeno), voltaje de carga de los condensadores $V_0 = 15 \text{ kV}$. Se utilizaron 24 disparos para realizar la caracterización, sobre lo que se realiza la estadística. Como ejemplo se muestra la señal típica de uno de los disparos, vea la figura (2.3).



(a) Circuito equivalente del sistema PF



(b) Señal de voltaje en el electrodo central

Figura 2.3: Circuito eléctrico para determinar los parámetros de caracterización del equipo SL, y señal de voltaje del electrodo central.

La medición y posterior calibración del voltaje V (y de V_{ind}) se hace con una punta de alto voltaje(punta de prueba Tektronix, modelo $P6015A$), y

2.2. DIAGNÓSTICOS ELÉCTRICOS DE LA DESCARGA PLASMA FOCUS19

la visualización con un osciloscopio de alta precisión (Tektronix TDS 2024C, 200 MHz 2GS/s).

Los valores de los parámetros de caracterización de cada descarga, se encuentran a partir del voltaje medido en el circuito RLC, y luego haciendo un ajuste de la señal con una función del tipo $V(t) = C + A \cos(2\pi(t - t_0)/T) \exp(-(t - t_0)/\gamma)$, se obtiene los parámetros eléctricos del circuito. Finalmente se hace la estadística sobre los 24 ajustes para cada uno de los parámetros, resultados que se muestran en la tabla (2.1).

Magnitud	Valor	Error	Unidad
Periodo (T)	4049	± 2	<i>ns</i>
Coefficiente de amortiguación (γ)	6745	± 43	<i>ns</i>
Inductancia Total (L)	118,7	$\pm 0,2$	<i>nH</i>
Resistencia	32	± 1	<i>mOhm</i>

Cuadro 2.1: Parámetros de calibración de Plasma Focus.

La inductancia total y la resistencia se determinan a partir de las siguientes relaciones:

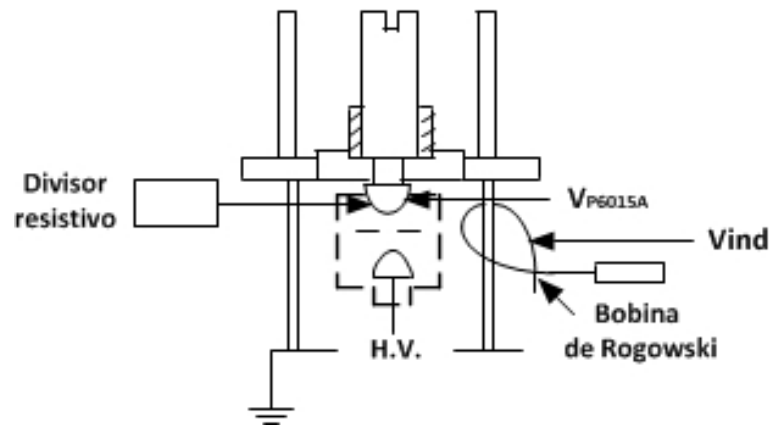
$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC_0} - \left(\frac{1}{\gamma}\right)^2}} \quad (2.1)$$

$$R = \frac{2L}{\gamma}$$

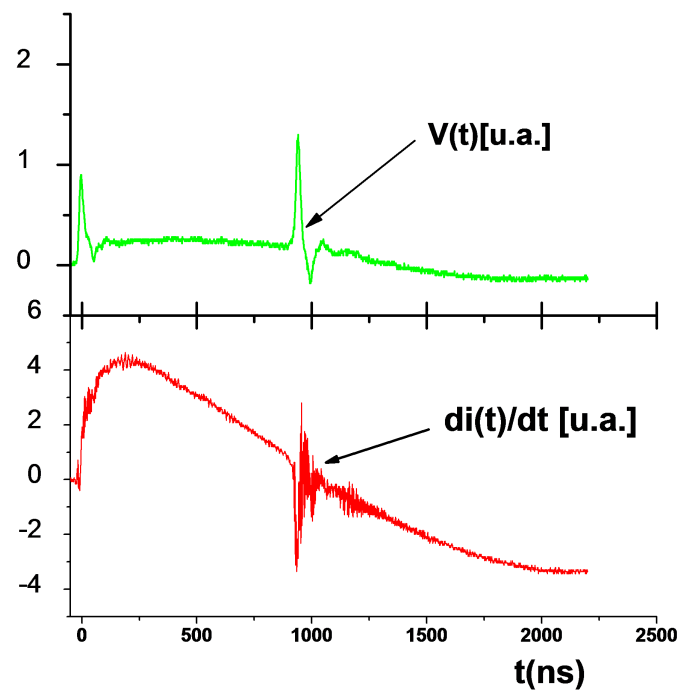
Donde $L = L_0 + L_f$, siendo L_f la inductancia en la base de los electrodos, su cálculo se explica mas adelante, figura 2.10.

2.2. Diagnósticos eléctricos de la descarga Plasma Focus

Se utilizan dos diagnósticos eléctricos para caracterizar la dinámica del plasma en el PF: un divisor resistivo y una bobina de Rogowski, el primero mide el voltaje del plasma V en la base de los electrodos y el segundo mide el voltaje inducido V_{ind} del banco en torno a una barra de tierra del spark gap según se muestra en el inciso *a*) de la figura (2.4).



(a) Ubicación de diagnósticos eléctricos



(b) Señales de descarga medidas por el divisor resistivo y la bobina de Rogowski

Figura 2.4: Diagrama de los diagnósticos y señales típicas producidas durante la descarga Plasma Foco.

La figura 2.4, muestra la ubicación de los diagnósticos eléctricos (a), y

2.2. DIAGNÓSTICOS ELÉCTRICOS DE LA DESCARGA PLASMA FOCUS21

las señales típicas *b*) observadas en el osciloscopio. Notar que el voltaje entre los electrodos como ya se dijo antes, esta dado por la ecuación (2.2):

$$\begin{aligned} V &= L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} + IR_P(t) \\ L &= L_P(t) + L_F \end{aligned} \quad (2.2)$$

Donde, $L_P(t)$ y $R_P(t)$ son variables en el tiempo, y corresponden a la inductancia y resistencia del plasma. En la etapa de compresión L_P crece abruptamente generando un sobrevoltaje dado por:

$$V - L \frac{dI}{dt} = I \frac{dL_P}{dt} \quad (2.3)$$

Donde se ha despreciado la resistencia del plasma R . En la etapa de compresión, $dI/dt = 0$, $I = I_{max}$, y el máximo valor del voltaje de descarga (*pinch*) es $V = I \frac{dL}{dt}$.

La calibración de los diagnósticos eléctricos también se realiza con electrodos cortocircuitados en la base. A continuación se presentan los métodos de calibración correspondientes.

2.2.1. Divisor resistivo

El divisor de voltaje resistivo, debido a su simplicidad, es uno de los más usados, consiste de una combinación de resistores que permite dividir el voltaje de entrada y entregar un voltaje de salida menor. El esquema del circuito construido y utilizado se presenta en la figura (2.5) donde se tiene la combinación de las resistencias $R_1 = 6,34k\Omega$, $R_2 = 27\Omega$, $R_3 = 466\Omega$, $R_4 = 50\Omega$, y un supresor de voltaje (S.V.) figura 2.5.

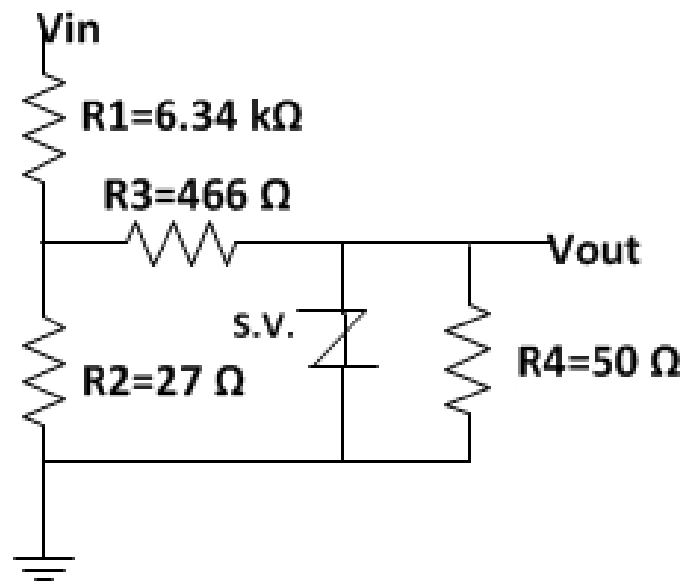


Figura 2.5: Circuito eléctrico del Divisor Resistivo.

Para estos resistores el factor divisor, en teoría es:

$$F = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2}\right)\left(\frac{R_3 + R_4}{R_4}\right)$$

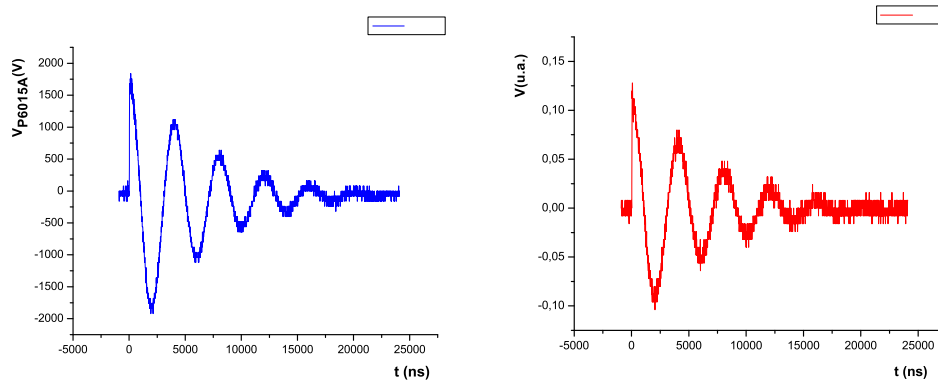
$$F = 2433,6 \quad (2.4)$$

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{2433,6}$$

2.2.2. Calibración del divisor de voltaje de descarga PF

Para la calibración del voltaje de descarga PF, se hace el ajuste de los valores de voltaje a través del divisor resistivo V y los valores de voltaje medidos por la sonda punta de prueba Tektronix V_{P6015A} . Las señales típicas medidas para un disparo particular, se presenta en la figura 2.6.

2.2. DIAGNÓSTICOS ELÉCTRICOS DE LA DESCARGA PLASMA FOCUS23



(a) Señal medida por la punta de prueba Tektronix (b) Señal medida a través del divisor resistivo

Figura 2.6: Medición voltaje de descarga PF.

Se gráfica los valores de V_{P6015A} vs V , y se hace el ajuste correspondiente, que resulta ser lineal, como se muestra en la siguiente figura.

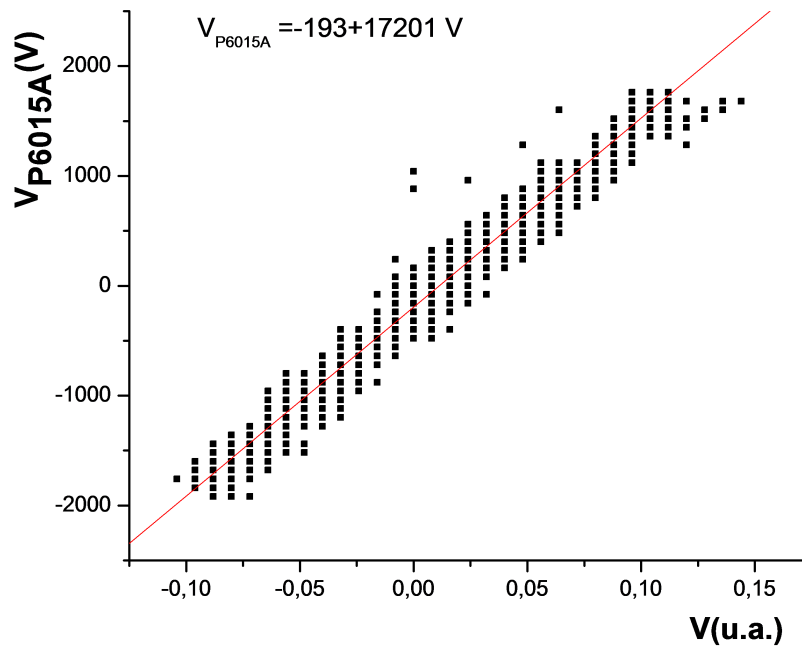


Figura 2.7: Relación de ajuste V_{P6015A} vs V .

En general se puede escribir una expresión de ajuste, del tipo:

$$V_{P6015A} = A + BV \quad (2.5)$$

Los valores finales para A y B se obtienen promediando sobre los 24 disparos realizados, valores que se muestran en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor	Error	Unidad
A	-193	± 3	V
B	17201	± 63	$V/u.a.$ (unidad arbitraria)

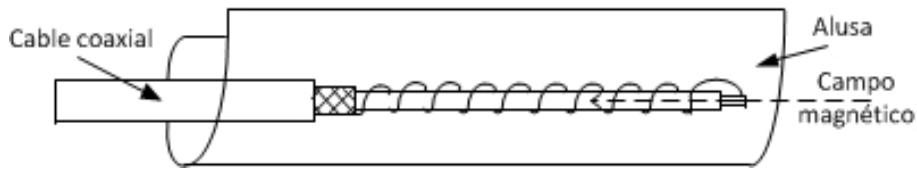
Cuadro 2.2: Tabla de ajuste de los valores de $VP6015A$ vs V .

Entonces el voltaje de descarga del PF, se determina a partir de la ecuación de ajuste V_{P6015A} vs V . Cuya pendiente varía respecto al factor divisor teórico (ecuación 2.4). Para hacer la comparación se hace $V_{in} = V_{P6015A}$ y $V = V_{out}/10$, por lo tanto se tiene para el divisor resistivo $V_{P6015A} = 24336V$, que difiere de la ecuación práctica 2.5, la diferencia se debe a la variación de la frecuencia de la señal, como consecuencia del ruido acústico y componentes de los cables de transmisión.

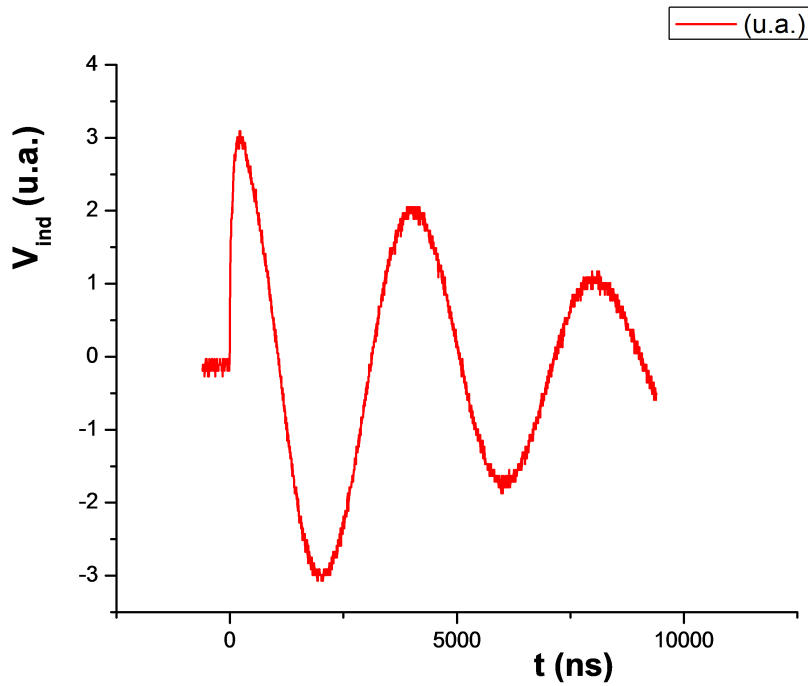
2.2.3. Bobina de Rogowski, calibración y obtención de corriente de descarga PF

La bobina de Rogowski se construye sobre un cable coaxial flexible en un extremo, sin malla de tierra, de 34 cm de longitud, y con un bobinado de 63 espiras de cable con 0,55 mm de diámetro. Se cubre luego esta longitud con un pliego de alusa aislada con láminas de plástico, para disminuir el ruido eléctrico. Finalmente se sitúa la bobina de Rogowski formando un círculo en torno a una de las barras de retorno del spark gap (ver figura 2.4a), de esta manera el voltaje inducido en la bobina es proporcional a la variación de corriente de descarga PF, $dI/dt = fV_{ind}$. El conjunto va conectado directamente a un cable coaxial $RG58$ que es terminado con 50 Ω y un divisor de 20 db . Se muestra un diagrama de construcción de la bobina de Rogowski y una señal típica del voltaje inducido en la figura 2.8.

2.2. DIAGNÓSTICOS ELÉCTRICOS DE LA DESCARGA PLASMA FOCUS25



(a) Esquema bobina de Rogowski



(b) Señal medida por la bobina de Rogowski

Figura 2.8: Bobina de Rogowski y voltaje inducido.

La calibración de la BR se hace en corto circuito, entonces teniendo el circuito RLC con el capacitor C_0 cargado, se tiene la ecuación $L \frac{dI}{dt} + RI + V_c = 0$. En el instante inicial, $\frac{dI}{dt}$ es máxima y la corriente cero, por lo tanto, $\frac{dI}{dt} = \frac{-V_0}{L}$, siendo V_0 el voltaje máximo del capacitor y L la inductancia del circuito RLC.

La variación de corriente en el circuito RLC es proporcional a la variación de corriente en la bobina de Rogowski, o sea: $\frac{dI}{dt} = fV_{ind}$, y en el instante

inicial se cumple que, $\frac{V_0}{L} = fA$, siendo A la amplitud inicial de V_{ind} , entonces:

$$f = \left(\frac{V_0}{L}/(A)\right) \quad (2.6)$$

Teniendo los valores de V_0 , L y la amplitud inicial promedio (A) de la señal de voltaje inducido para todos los disparos, se obtiene la tabla 2.3.

Parámetro	Valor	Error	Unidad
Amplitud A	3,5	0,3	V
Factor de calibración f	37,9	0,7	$(GA/s)/V$

Cuadro 2.3: Parámetros de calibración bobina de Rogowski.

Integrando dI/dt del circuito RCL, se obtiene la corriente de descarga del Plasma Focus, figura (2.9).

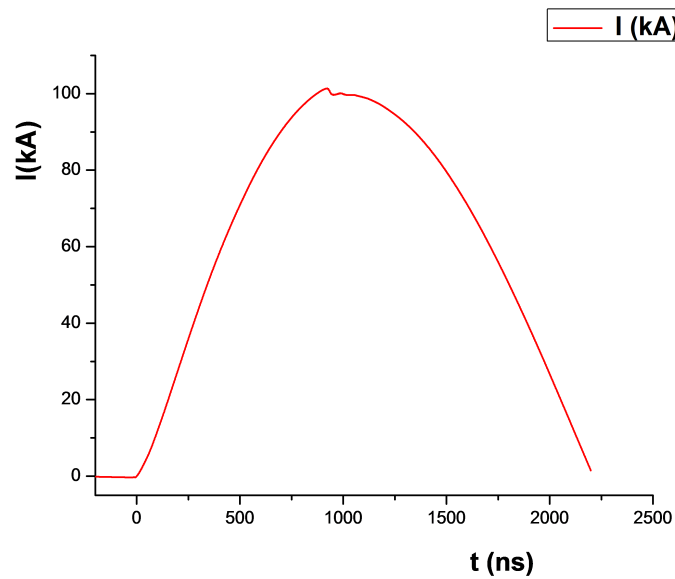


Figura 2.9: Corriente de descarga PF.

Adicionalmente se puede obtener L_F usando la calibración, pues el voltaje en corto-circuito en la base de electrodos, para una descarga particular es:

2.2. DIAGNÓSTICOS ELÉCTRICOS DE LA DESCARGA PLASMA FOCUS27

$$V = L_F \frac{dI}{dt} = L_F f V_{ind} \quad (2.7)$$

Donde V se mide con la punta Tektronix $P6015A$, figura (2.10).

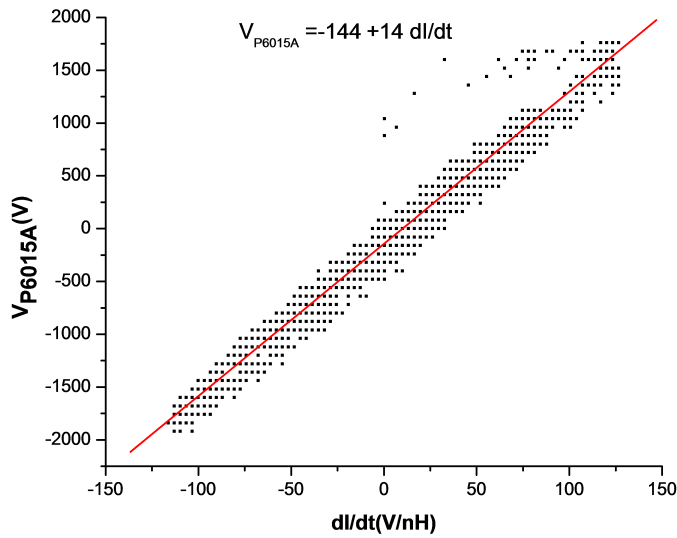


Figura 2.10: Ajuste V_{P6015A} vs dI/dt .

Se obtiene la ecuación de ajuste de V_{P6015A} vs dI/dt .

$$V_{P6015A} = A + B \frac{dI}{dt} \quad (2.8)$$

Siendo el parámetro $B = L_f$, la inductancia fija de la base de los electrodos. Haciendo una estadística sobre las 24 descargas se obtiene finalmente los valores promedios de: $L_F = (15,5 \pm 0,3)(nH)$ y $L_0 = L - L_F = 103,2 \pm (nH)$. Las señales eléctricas de descarga (voltaje a través de divisor resistivo, voltaje inducido por la bobina de Rogowski, corriente), una vez ya calibradas se muestran en la figura 2.11.

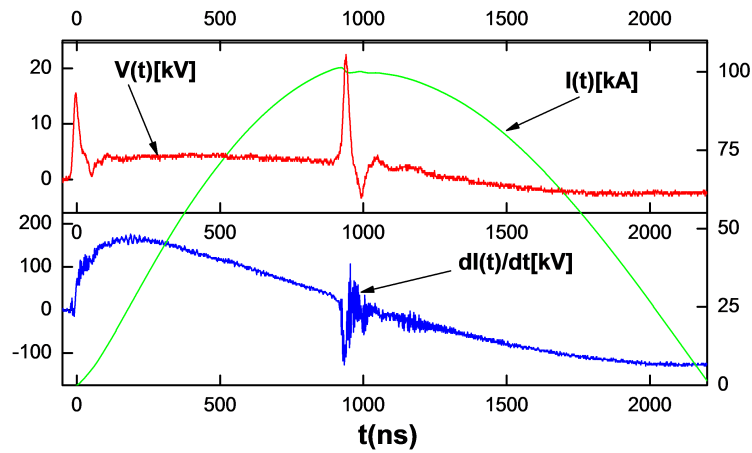


Figura 2.11: Señales de descarga PF calibradas.

2.2.4. Aplicación PF

Terminada la caracterización del equipo PF Sumaj Lauray, se procede con su aplicación, esta consiste en aprovechar los iones producidos en el plasma, para modificar las propiedades topográficas y ópticas, de las obleas de Si(100) tipo n, mediante bombardeo iónico. Para iniciar con el bombardeo, primeramente se construye y se hace el montaje del soporte de muestra, justamente para situar muestras con dimensiones de $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ de superficie, y a una distancia de 150 mm por encima del extremo superior del electrodo central, vea la figura(2.12).

2.2. DIAGNÓSTICOS ELÉCTRICOS DE LA DESCARGA PLASMA FOCUS29

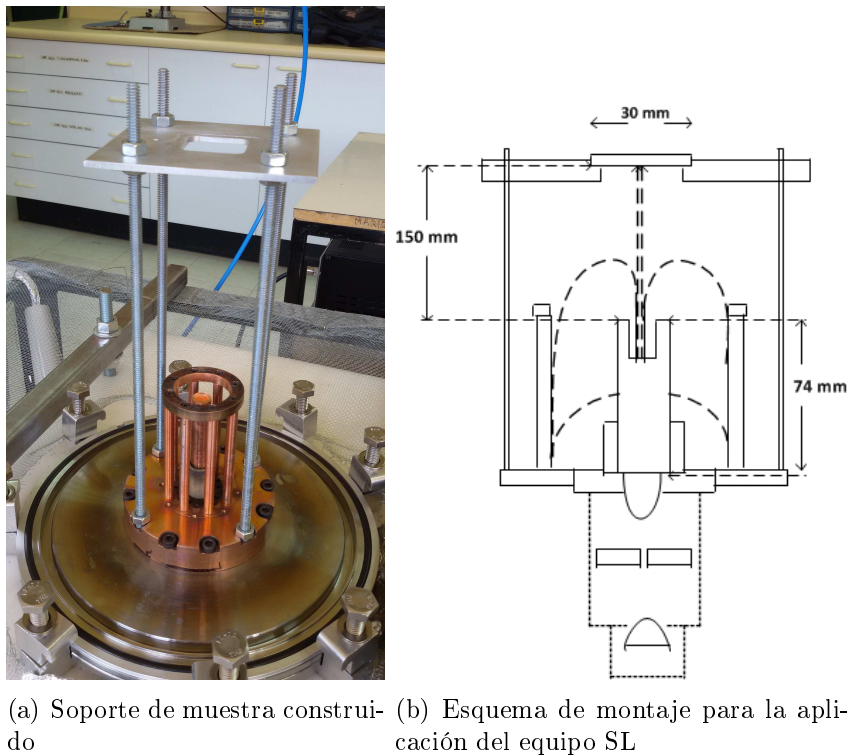


Figura 2.12: Preparación del equipo SL, para su aplicación mediante el bombardeo iónico a obleas de silicio.

Procedimiento de aplicación PF

Terminado el montaje de la muestra, se procede con el acondicionamiento del equipo; para ello se fija el voltaje del banco a 20 kV y presión de gas H_2 en la cámara de descarga a $2,5\text{ Torr}$. Bajo estas condiciones, se inicia con una serie de bombardeos iónicos de muestras, tabla 2.4.

Obleas de Si	Número de shots	Voltaje del banco (kV)	Presión H_2 (Torr)
Si-1	20	20	2.5
Si-2	5	20	2.5
Si-4	30	20	2.5
Si-17	10	19	2.5

Cuadro 2.4: Tabla de la serie de bombardeos iónicos en obleas de silicio.

La muestra $Si - 17$ de la tabla, tiene diez disparos, pero solamente nueve

de ellos presentan *pinch*, y corresponde a la tercera serie de bombardeo iónico, mientras que $S_i - 1, 2, 4$ corresponden a la primera serie.

2.3. Condiciones de operación del PF: caracterización eléctrica e implantación de iones

La caracterización del equipo PF, se realizó bajo las siguientes condiciones: largo del aislante $L_a = 23 \text{ mm}$, largo del ánodo $L = 38, 54, 74, 94, 114 \text{ mm}$, presión de hidrógeno de 1 a 10 Torr con incrementos de 1 Torr, voltaje de operación 20 kV .

Para el bombardeo iónico se trabajó con un ánodo de 74 mm de longitud, y una presión de $2,5 \text{ Torr}$.

2.4. Técnicas de caracterización de muestras

Para la caracterización de las propiedades morfológicas y optoelectrónicas de una muestra a escala nanométrica, se recurre a distintas técnicas de caracterización. A continuación se describen de manera breve, las técnicas de caracterización utilizadas en este proyecto.

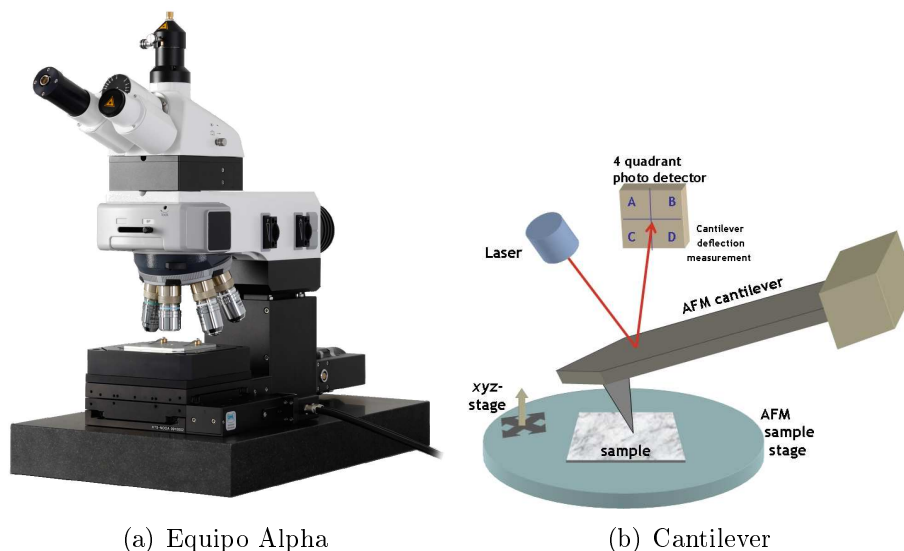
2.4.1. Microscopía de Fuerza Atómica AFM

El microscopio de fuerza atómica (AFM, de sus siglas en inglés) es un instrumento mecano-óptico capaz de detectar fuerzas del orden de los nanonewtons. La Microscopía de Fuerza Atómica, es una de las técnicas más utilizadas en la caracterización morfológica, micro y nanoestructural; gracias al uso de un haz de luz, que ilumina una viga con punta de barrido superficial, la cual ayuda a construir imágenes y medir propiedades físicas. En un AFM se distinguen tres modos de operación básicos que son: el modo de contacto, contacto intermitente o tapping y no-contacto; a continuación se describe solamente el modo de contacto, modo utilizado en esta tesis.

Modo de contacto

En el modo de contacto, la punta barre la superficie de la muestra, mediante una fuerza aplicada al cantilever y que está relacionada con la deflexión de la viga; así $F = kD$, donde F es la fuerza aplicada, k es la constante de fuerza del cantilever y D la deflexión del cantilever. Por lo tanto, trabajar a una deflexión constante implica trabajar a una fuerza constante. Así se fija la

deflexión de trabajo (D_{sp} ; $sp = setpoint$), y mientras se realiza el barrido, el escáner sube o baja en Z , de manera que la deflexión se mantenga constante. El movimiento vertical y lateral de la punta, provee la topografía en base a la imagen de las alturas, vea la figura (2.13).



(a) Equipo Alpha

(b) Cantilever

Figura 2.13: Microscopio de Fuerza Atómica.

En el inciso *b*), se observa el proceso para la generación de imágenes de alturas, básicamente el haz de luz del laser, es reflejada sobre un detector de luz de cuatro cuadrantes, y dependiendo de la incidencia sobre los cuadrantes se va generando la imagen.

2.4.2. Espectroscopía de fotoelectrones (XPS, según siglas en inglés)

Es una espectroscopía cuantitativa y de baja resolución espacial, que habitualmente se utiliza para análisis químico elemental, estados de oxidación y electrónico en la superficie de las muestras, hasta una profundidad máxima de $3nm$. La técnica XPS se basa en la irradiación de una muestra con rayos X, en general no monocromatizado que mide la energía de enlace y número de los fotoelectrones que llegan al detector longitudinal, debido a la absorción de rayos X o excitación de los átomos de la muestra, ver figura(2.14).

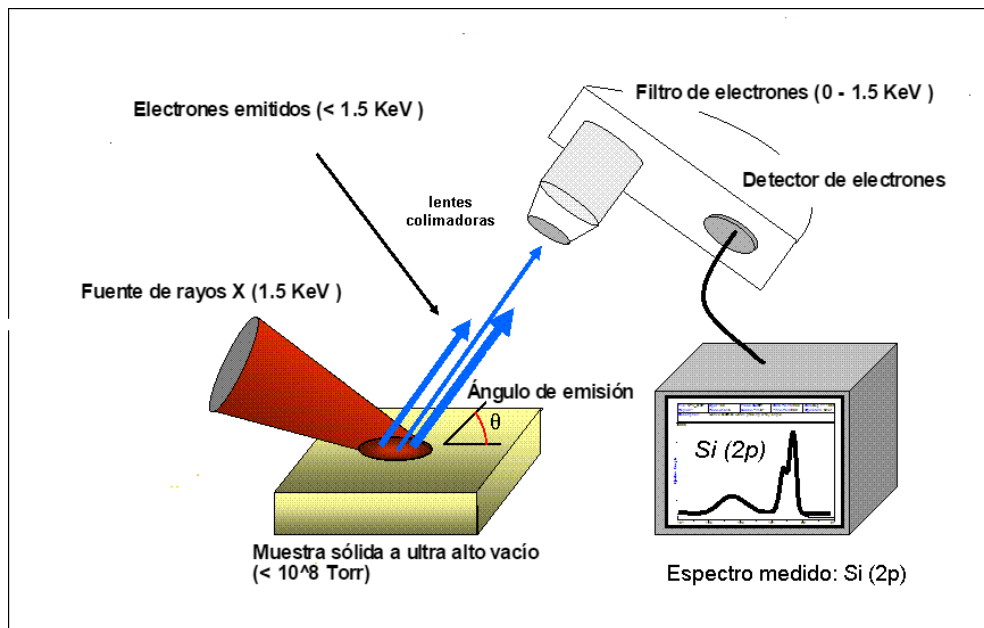


Figura 2.14: Espectroscopía de fotoelectrones excitados por $R - X$.

2.4.3. Técnica de caracterización RAMAN

La espectroscopía RAMAN, se usa en el estudio de los modos vibracionales y rotacionales de baja frecuencia en una muestra, se basa en la dispersión inelástica de la luz monocromática de un laser, en un rango que va desde el infrarrojo cercano hasta el ultravioleta cercano. Los fotones de la luz incidente interactúan con los fonones u otras excitaciones de la muestra, causando que los fotones sufran un desplazamiento en energía, ya sea a valores mayores (Anti Stokes) o menores (Stokes), o simplemente haya una reflexión (Rayleigh), figuras (2.15) y (2.16). El desplazamiento en energía da información sobre los modos vibracionales del sistema. A partir de la información de los modos vibracionales, se puede identificar las diferentes fases en las muestras, como la presencia de óxidos metálicos, carbonatos, sulfatos u otros compuestos.

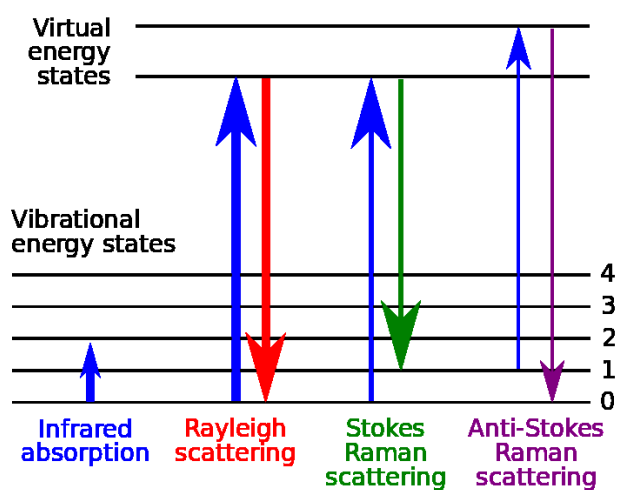


Figura 2.15: Dispersión RAMAN.

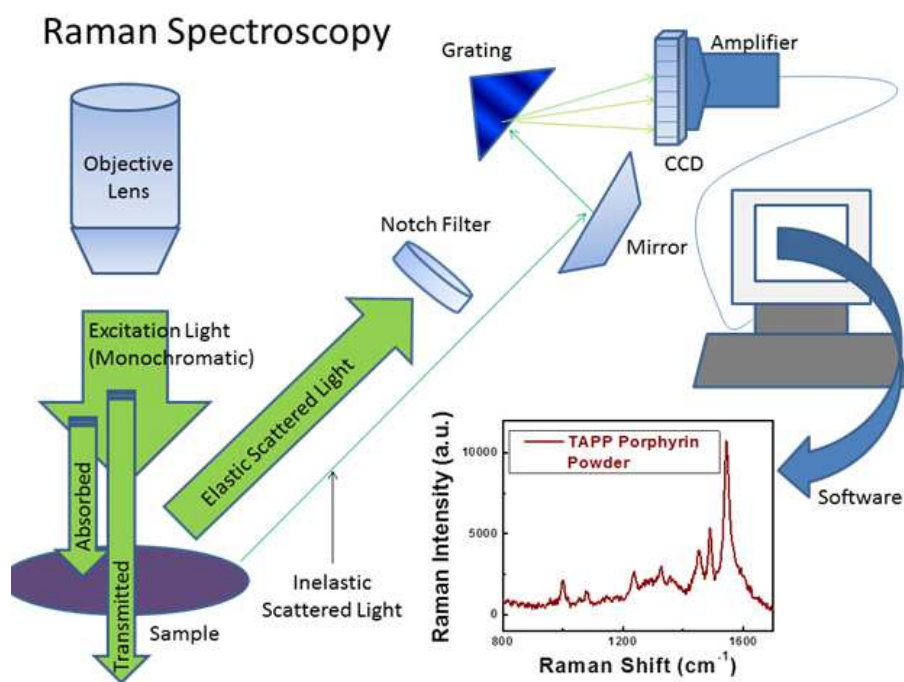


Figura 2.16: Espectroscopía RAMAN y sus modos de dispersión.

Capítulo 3

Resultados y análisis

El objetivo general de este proyecto de tesis, es la construcción de un dispositivo Plasma Focus de baja energía y su caracterización, para modificar las propiedades morfológicas y optoelectrónicas de obleas de silicio(100) tipo n. El dispositivo construido, que se muestra en la figura 3.1, se operó con las siguientes características eléctricas:

Parámetros	
V_{op}	20 kV
I_{mx}	112 kA
E	720 J

Cuadro 3.1: Parámetros de funcionamiento del dispositivo PF.

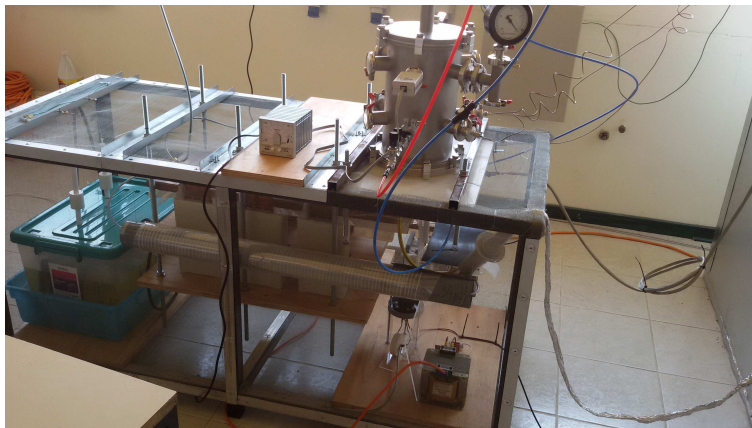


Figura 3.1: Equipo Sumaj Lauray SL implementado.

El proceso de caracterización del equipo PF implementado, se inicia con el estudio del tiempo de llegada de la lámina de corriente a la boca del ánodo t_{dip} , como función de la presión en la cámara de descarga, para distintas longitudes del electrodo central. Esto con la finalidad de obtener el rango de operación, tanto de la presión de cámara de gas como de la longitud del electrodo central, el resultado de este estudio se presenta en la figura 3.2.

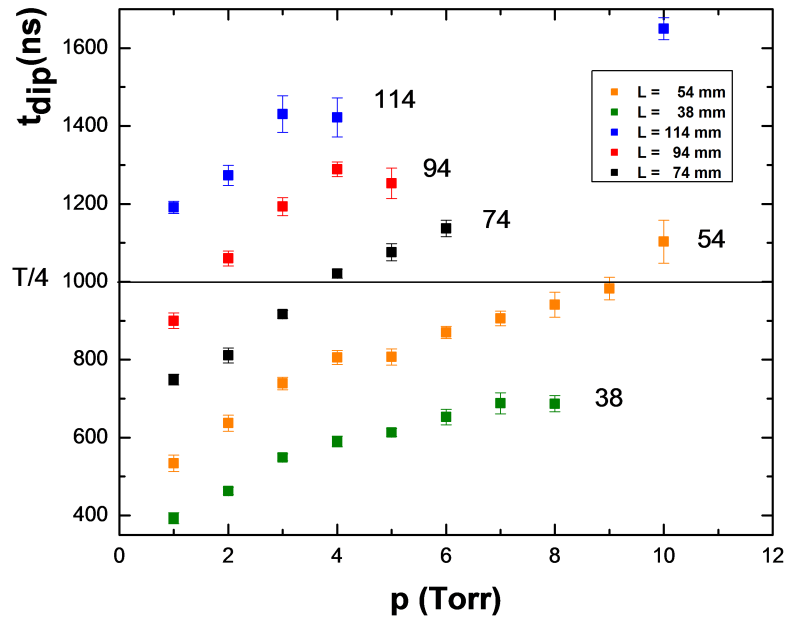


Figura 3.2: Tiempo dip (ns) Vs. presión de la cámara de descarga ($Torr$).

El cuarto de periodo de la descarga PF corresponde a un tiempo de aproximadamente $T/4 = 1012 ns$, solo para largos de $54 mm$ a $94 mm$ se logra cruzar este nivel de tiempo, en el rango de presiones explorados. Se busca las condiciones para que el *pinch* se produzca a $T/4$, ya que a este tiempo la corriente es máxima, de acuerdo a la variación de $\frac{dI}{dt} = fV_{ind}$ en la figura 2.8.

Un parámetro de interés para caracterizar la emisión de iones es el voltaje en el momento del *pinch* V_{pinch} como una función de la presión de hidrógeno y la longitud de los electrodos L , figuras (3.3) y (3.4). Se busca las condiciones en que el voltaje del *pinch* sea máximo y que la variación del voltaje del *pinch* sea mínima. Estas condiciones se encuentran para longitudes entre $54 mm$ y $74 mm$, y para presiones entre 2 y 4 Torr.

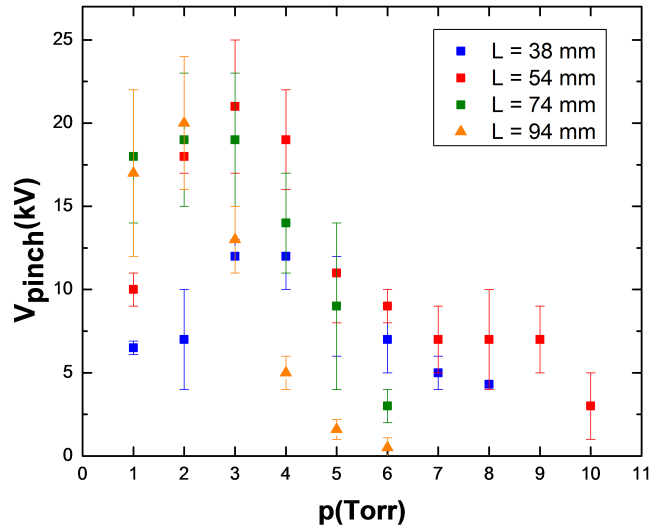


Figura 3.3: Voltaje pinch (kV) Vs. Presión de la cámara de descarga ($Torr$).

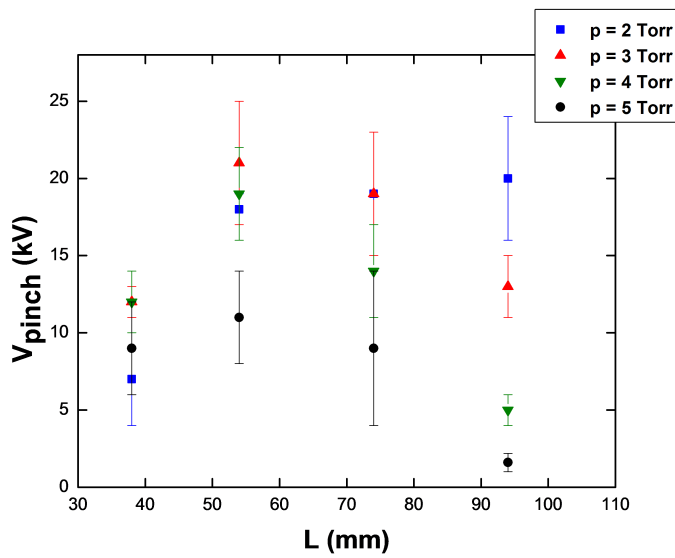


Figura 3.4: Voltaje pinch (kV) Vs. Longitud del electrodo (mm).

Finalmente se obtiene el gráfico 3.5, del tiempo t_{dip} vs longitud del elec-

trodo central L , a una presión de descarga de 3 Torr. Claramente la relación entre t_{dip} y L es proporcional, lo que significa que a mayor longitud de electrodo central, mayor es el tiempo t_{dip} . Se hace la variación de la longitud del electrodo con el fin de que, t_{dip} se produzca a un 1/4 del periodo de la señal de descarga, ya que a este tiempo la variación de corriente de descarga (di/dt) es cero y la corriente es máxima.

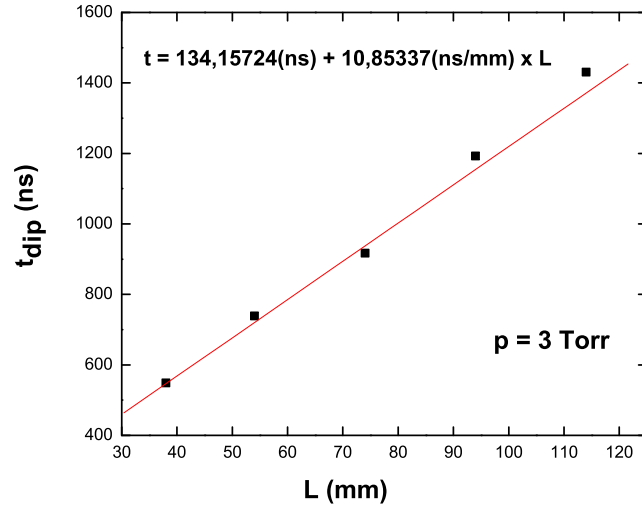


Figura 3.5: Tiempo $t_{dip}(ns)$ Vs. longitud del electrodo $L(mm)$.

Los resultados encontrados con respecto al acondicionamiento del equipo PF, pueden ser corroborados con el modelo teórico de Sing Lee presentado en el capítulo 1 (ecs. 1.4 y 1.5), que se basa en el modelo del cilindro hueco de gas que se desplaza, producido por el desplazamiento de la lámina de plasma. Uno de los resultados encontrados de Sing Lee, es el tiempo de tránsito axial a lo largo del ánodo. A continuación se muestra uno de los resultados de las ecuaciones de Sing Lee (ecs. 1.4 y 1.5), específicamente la ecuación del tiempo de tránsito axial en términos de las variables mencionadas anteriormente.

$$t_a = \left[\frac{4\pi^2(c^2 - 1)}{\mu l n c} \right]^{1/2} \frac{z_0 \rho_0^{1/2}}{\left(\frac{I_0}{a} \right)} \quad (3.1)$$

Donde, como ya se mencionó anteriormente, $c = \frac{b}{a}$, b es el radio externo

del cilindro de gas, a es el radio interno del cilindro de gas, μ es la permeabilidad magnética, z_0 es la longitud del electrodo interno, I_0 es la corriente máxima de descarga, y ρ_0 la densidad del ambiente.

Para el caso de este proyecto de tesis, los valores de los parámetros mencionados son: $a = 6,075mm$, $b = 18,03mm$, $P = 3Torr = 399,967Pa$, corriente máxima de descarga $I_0 = 101,4kA$, densidad de gas calculada con la ecuación de gases ideales a temperatura de $20^\circ C$, y $f_m = 1$. Reemplazando en la ecuación 3.1, se obtiene el tiempo de tránsito axial versus longitud del ánodo.

$$t_a = 17,024 \left(\frac{ns}{mm} \right) z_0 \quad (3.2)$$

Si se compara con los resultados experimentales encontrados, se obtiene el siguiente resultado.

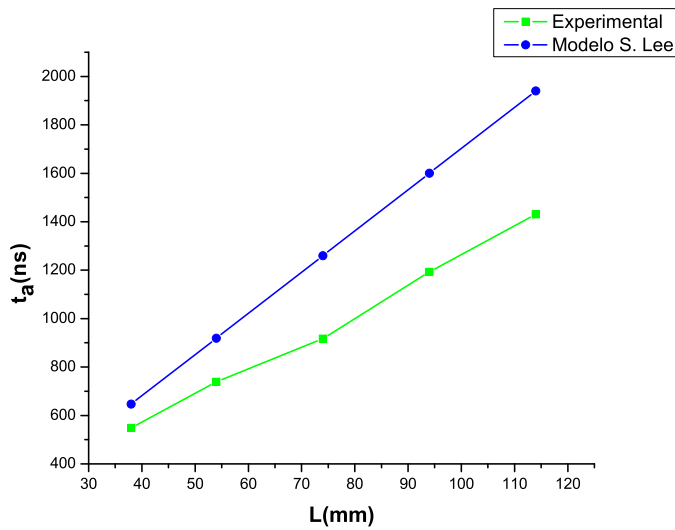


Figura 3.6: Comparación de tiempo de tránsito a lo largo del ánodo versus longitud del ánodo, experimental y modelo teórico de Sing Lee.

La línea de color verde corresponde al resultado experimental sin considerar la longitud del aislante, el de color azul es la línea teórica de Sing Lee.

Así mismo se hace la comparación teórico-experimental de t_a vs. ρ_0 , para longitud de electrodo central fija $74mm$.

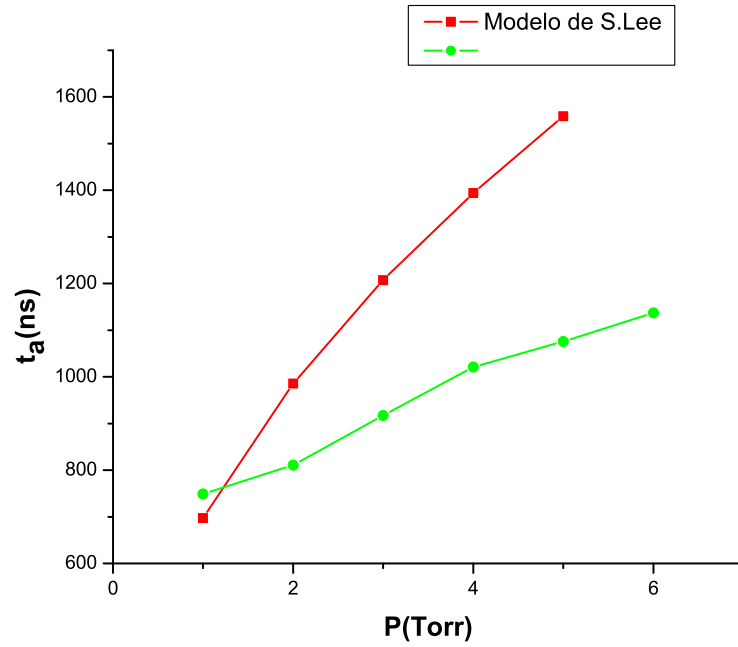


Figura 3.7: Comparación de tiempo de tránsito a lo largo del ánodo versus densidad de gas (H_2) en la cámara de descarga, experimental y modelo teórico de Sing Lee.

Finalmente se obtienen las velocidades de la lámina de corriente, en la dirección axial a partir de $V_a = L/t_{pinch}$, y se comparan con el modelo teórico de Sing Lee:

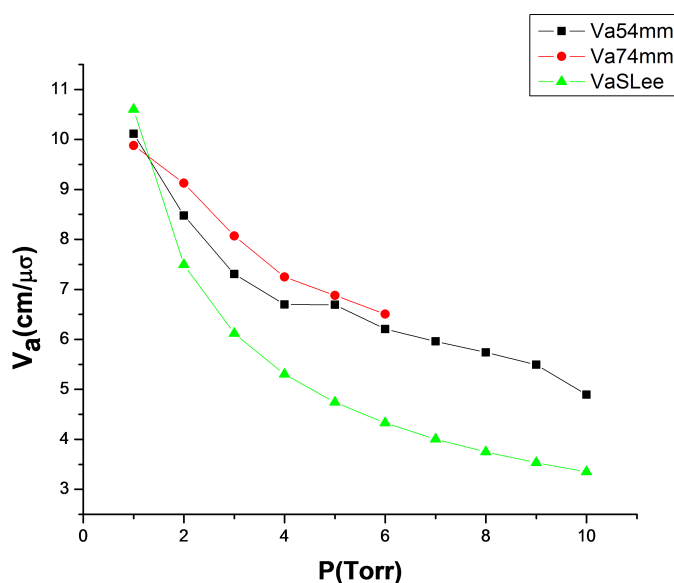


Figura 3.8: Aplicación del modelo teórico de Sing Lee, velocidad axial de la lámina de corriente.

Las velocidades experimentales axiales, encontradas a partir de la relación $V_a = L/t_{pinch}$, caen por encima de los valores teóricos de Sing Lee, pero se encuentran dentro del rango de valores esperados, con una variación aproximada de $5\text{cm}/\mu\text{s}$ a $10\text{cm}/\mu\text{s}$.

3.1. Caracterización de las muestras

Como ya se dijo anteriormente, la aplicación del equipo PF, se centra en la modificación de las propiedades morfológicas y optoelectrónicas, de obleas de silicio. A continuación se presenta los resultados obtenidos, con relación a la topografía de las superficies y presencia de cobre en las muestras de silicio, a partir de imágenes AFM, espectro RAMAN y XPS.

3.1.1. Técnica de caracterización AFM

Son analizadas muestras de silicio monocristalino(100) tipo n , sometidas a 5, 20 y 30 disparos respectivamente, junto a ellas también se observa la muestra con cero disparos. Estas imágenes son presentadas en $3D$, con el fin de visualizar mejor las variaciones en la topografía de superficie, tal como observa en la figura 3.9.

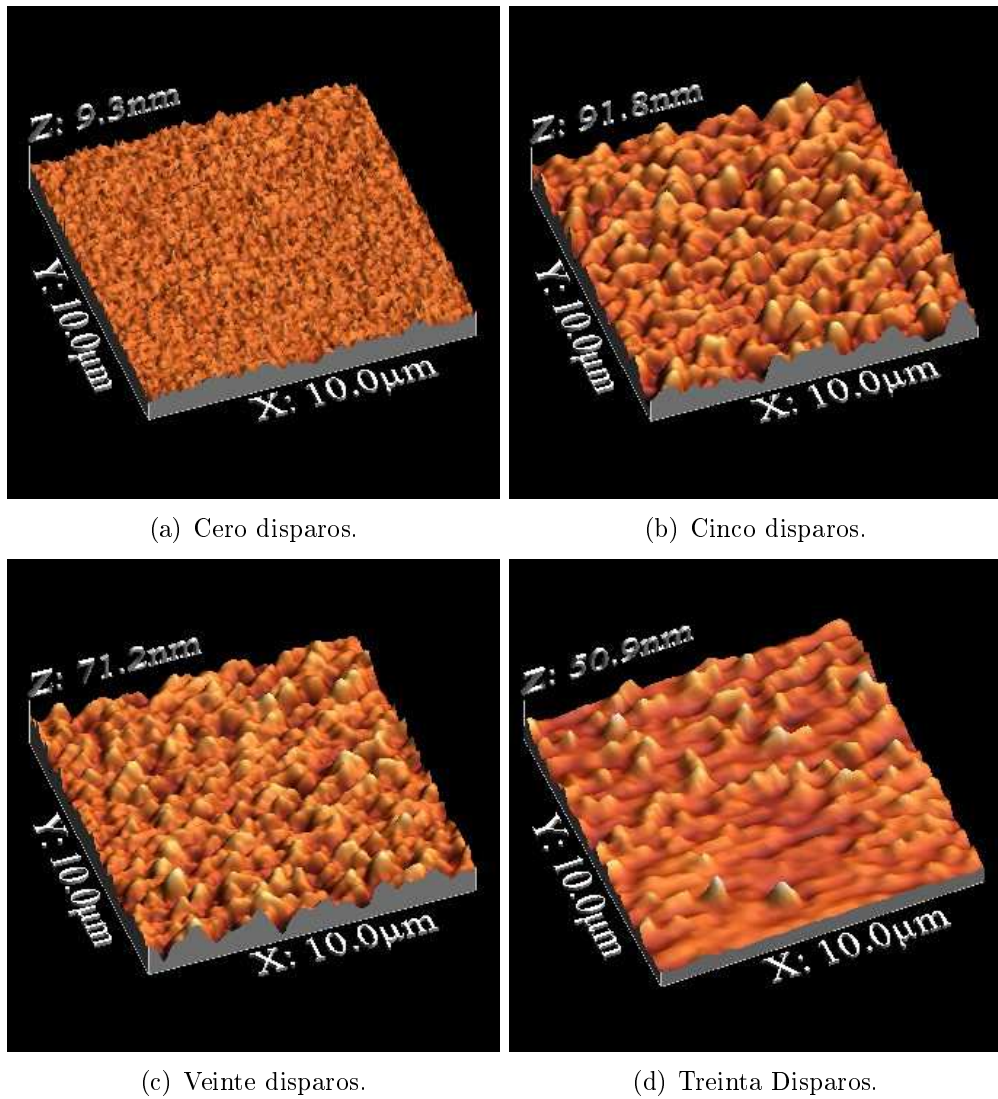


Figura 3.9: Topografía 3D, superficies de obleas de silicio.

Las imágenes tienen dimensiones de $10 \times 10 \mu m^2$, y son extraídas de las zonas más limpias de la superficie. Por ejemplo para la muestra con 30 disparos, se extrae la información de la zona marcada en la figura 3.10.

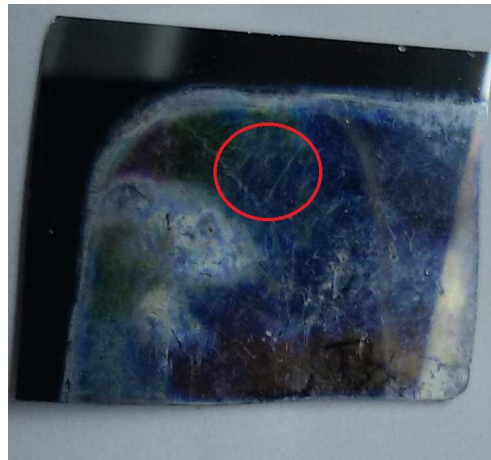


Figura 3.10: Fotografía de la oblea de silicio con 30 disparos.

Extracción de información AFM

Con la finalidad de observar la diferencia en topografía, entre muestras sometidas a distinto número de disparos y una muestra sin disparos. Se realiza el análisis estadístico de las propiedades topográficas de las imágenes, mediante la extracción de histogramas de pixeles que representan las variaciones topográficas de superficie y gráficos de sección transversal de las muestras (rugosidad), como ejemplo se muestra las figuras 3.11 y 3.12, correspondientes a cero y treinta disparos.

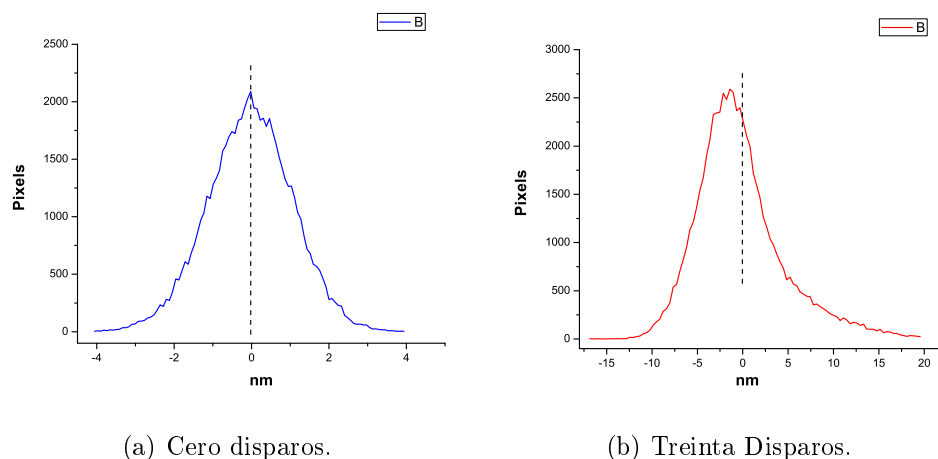
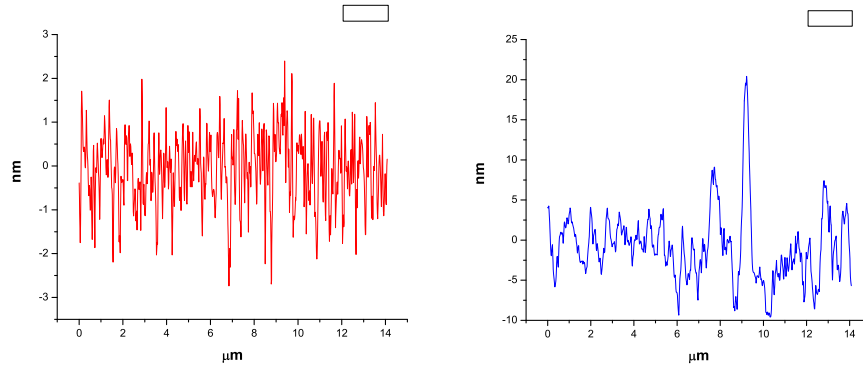


Figura 3.11: Histograma de imágenes AFM. de obleas de silicio.

En los gráficos mostrados, se observa un corrimiento de la distribución de

pixeles.



(a) Cero disparos.

(b) Treinta Disparos.

Figura 3.12: Perfil de altura de obleas de silicio.

Resumen, estadística de las imágenes AFM

A continuación se presenta la tabla de caracterización, como consecuencia de los efectos producidos en superficie y cerca de superficie, por distinto número de disparos.

Número de disparos	Máximo de pixeles	Desviación del máximo de pixeles (μm)
0	2086	-0.02
5	2145.6	-0.54
20	2142.7	-0.52
30	2588.3	-1.42

Cuadro 3.2: Parámetros de caracterización de las obleas de silicio extraídas a partir de imagen AFM.

La tabla 3.2, resume la información más importante extraída a partir de imágenes AFM. La columna de máximo de pixeles representa al número de pixeles dominantes, correspondientes ya sea a la cantidad de montículos o huecos, dependiendo del desplazamiento hacia derecha o izquierda; por ejemplo para *Si16* que tiene 0 disparos, el máximo de pixeles se encuentra en $z = 0$ aproximadamente y es la más baja, lo que significa que la mayoría de

los pixeles de la imagen, representan a una superficie que no ha sufrido daño. Para *Si2* con 5 disparos la cosa es distinta, esta ha sufrido un corrimiento del máximo de pixeles hacia la izquierda de $-0,5nm$, dando información de que la superficie ha experimentado una acumulación escasa de nano-partículas en superficie. La información extraída de *Si4* es aún mucho mas interesante, pues el máximo de pixeles para esta muestra también ha sufrido un corrimiento hacia la izquierda, levemente mayor que para *Si2* a pesar de tener seis veces mayor el número de disparos, la razón es simple; cuando el número de disparos es muy alto, los espacios vacios se van rellenando de nano-partículas, y así mismo en las superficies se van acumulando nano-partículas[15].

3.1.2. Técnica de caracterización RAMAN

Los espectros RAMAN correspondientes a muestras con 5 y 10 disparos y expuestas a diferentes tiempos de oxidación, se muestra a continuación, figura (3.13).

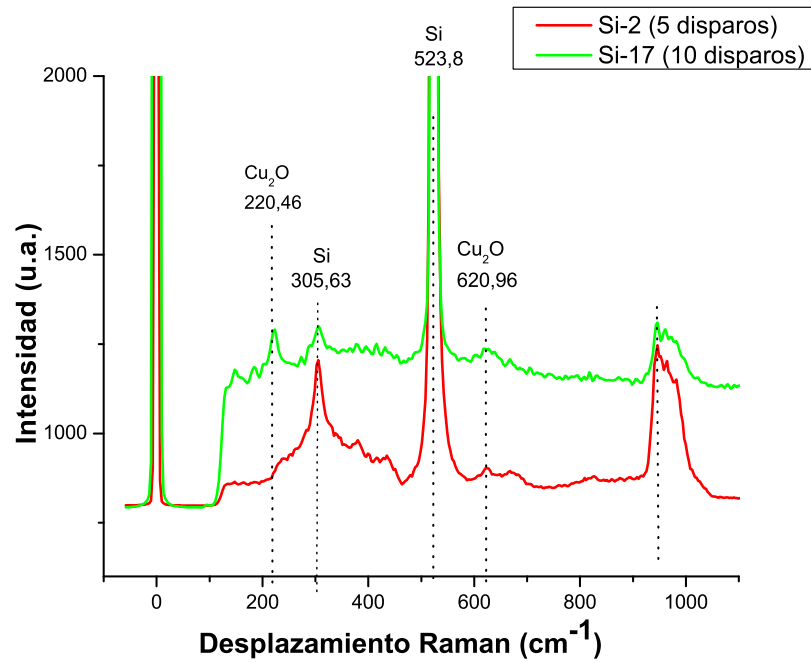


Figura 3.13: Espectro RAMAN de la oblea de silicio sometida al bombardeo de iones de cobre, 5 y 10 disparos, con diferentes tiempos de oxidación.

La figura (3.13), presenta el espectro Raman de las muestras *Si* – 2 y *Si* – 17, sometidas a 5 y 10 disparos respectivamente. El espectro de color rojo correspondiente a la primera serie de mediciones, presenta *Cu(I)* con una intensidad muy baja, con modos vibracionales en $620,96\text{cm}^{-1}$; el espectro que corresponde al color verde de la cuarta serie de mediciones y con menor tiempo de oxidación, presenta *Cu(I)* en $220,46\text{cm}^{-1}$ y $620,96\text{cm}^{-1}$. Esta diferencia se debe tanto a la diferencia en tiempo de oxidación como al número de disparos con *pinch*, en la siguiente tabla se presenta los voltajes *pinch* de cada uno de los disparos.

Muestra, Si-2	Voltaje <i>pinch</i> (kV)	Muestra, Si-17	Voltaje <i>pinch</i> (kV)
1	14	1	7.8
2	19	2	8
3	19	3	10.6
4	20	4	11
5	17,20	5	11
		6	12
		7	4.5
		8	12
		9	12
		10	11

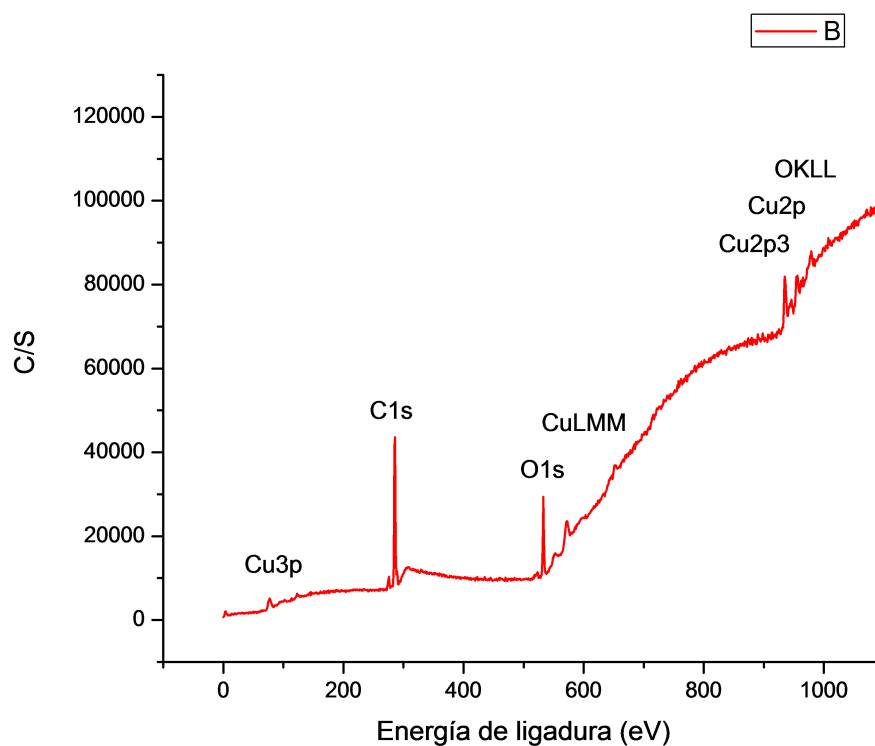
Cuadro 3.3: Voltajes *pinch*, para $Si - 2$ y $Si - 17$.

Para la muestra $Si - 2$, los voltajes *pinch*, son notoriamente mas intensos que para el $Si - 17$, lo que explica que para la segunda muestra los iones de cobre puede que hayan quedado en la superficie, por falta de energía.

3.1.3. Técnica de caracterización XPS

Las condiciones de trabajo utilizados en el estudio XPS, son los siguientes: Fuente de R-X Aluminio, voltaje de aceleración R-X $15kV$, potencia de R-X $400W$ y energía de R-X $44,75eV$.

La técnica XPS, se aplica a las muestras $Si - 17$ y $Si - 18$, con 10 y 5 disparos respectivamente. El espectro de todos los elementos presentes en las dos muestras, y los orbitales $Cu2p_{3/2}$ de alta resolución, se visualizan en las figuras (3.14) y (3.15).



(a) Espectro completo

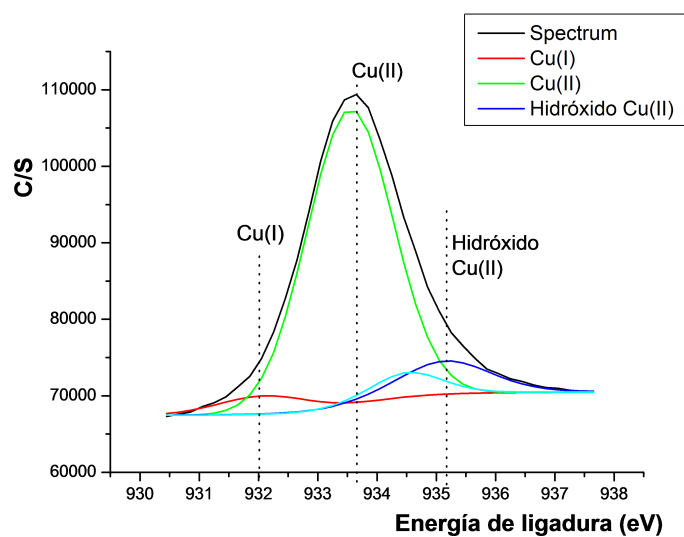
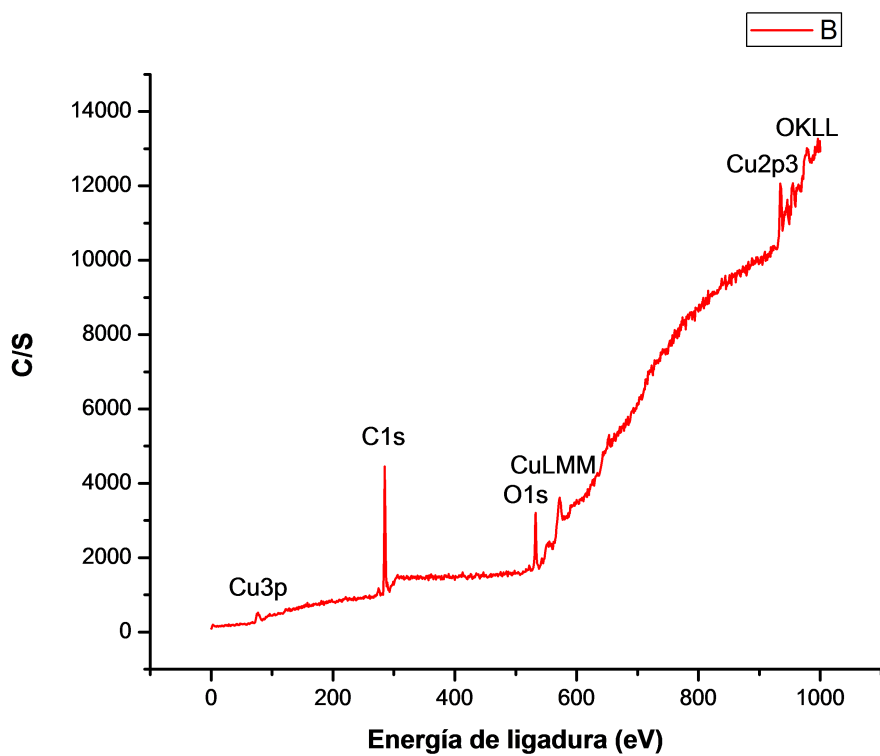
(b) Espectro $Cu2p_{3/2}$ de alta resolución, ángulo $\beta = 12^\circ$

Figura 3.14: Espectro XPS de la muestra con 5 disparos.



(a) Diez disparos

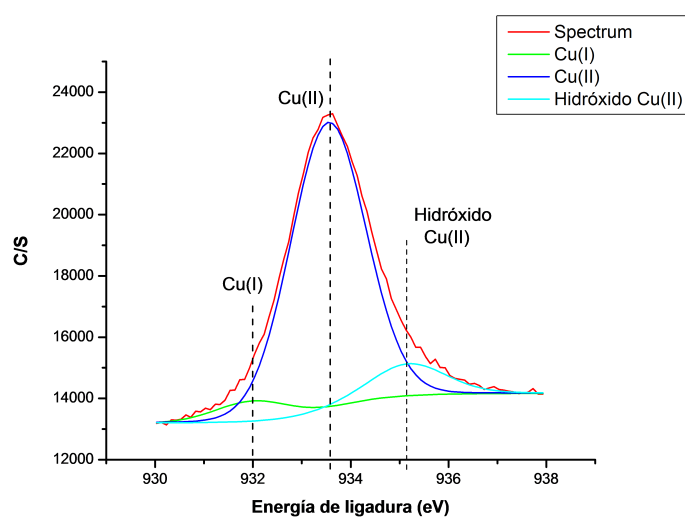
(b) Espectro $Cu_{2p_{3/2}}$ de alta resolución, ángulo $\beta = 2^0$

Figura 3.15: Espectro XPS de la muestra con 10 disparos.

En ambos espectros de las figuras (3.14) y (3.15), se verifica la pureza de las muestras, pudiéndose observar únicamente la presencia de: cobre, silicio, carbono y oxígeno; así mismo el ajuste de las bandas de energía a los orbitales $Cu2p_{3/2}$ de alta resolución, advierte que el cobre presente en las obleas de silicio se encuentra oxidado, con presencia de Cu(I), Cu(II) y Hidróxido de Cu(II). La tabla (3.4), presenta las concentraciones porcentuales de los elementos correspondientes a los orbitales $C1s$, $O1s$, $Cu2p_{3/2}$.

Orbital	Concentración porcentual (5 Disp.)	Concentración porcentual (10 Disp.)
C1s	1.4	2.4
O1s	0.3	0.5
Cu2p3	0.1	0.3

Cuadro 3.4: Cantidad porcentual de $Cu2p_3$, $C1s$ y $O1s$ presente en las obleas de silicio con 5 y 10 disparos.

La presencia porcentual de $Cu2p_3$, varía con el número de disparos, siendo mayor en la muestra con 10 disparos.

Capítulo 4

Discusión

Este trabajo mas alla de cumplir con los objetivos planteados, quiere dar luces al estudio de implantación de iones metálicos en obleas de silicio, ya sea utilizando un Plasma Focus u otro equipo de implantación.

El Plasma Focus (PF) construido es un excelente candidato a utilizar, para procesos de implantación de impurezas en muestras de interés, puesto que su operación no necesita grandes conocimientos, así mismo los equipos e insumos complementarios al equipo PF, son fáciles de conseguir y relativamente baratos. Este equipo aparte de utilizarse para implantación, tiene otras aplicaciones como ser, producción de neutrones, Rayos X, etc.

El equipo PF construido de energía ($0,7 \text{ kJ}$), se encuentra dentro de los equipos Plasma Focus de baja energía. El voltaje máximo y corriente máxima de descarga alcanzan a valores: $V = 22 \text{ kV}$ y $I = 100 \text{ kA}$ aproximadamente, los mismos pueden mejorarse aunque no significativamente, variando la longitud de electrodos, presión de gas en la cámara de descarga, separación de los electrodos internos y externos, así mismo se estudió la dinámica del plasma producido, como resultado se encontró que las variables dinámicas del plasma V_a y t_a , se ajustan muy bien a los resultados teóricos.

La aplicación del equipo PF construido se centró, en utilizar el plasma producido para implantar iones de cobre en obleas de silicio monocristalino, con la finalidad de variar las propiedades optoelectronicas de las obleas. El efecto de la implantación fué estudiado por distintas técnicas de caracterización.

Las distintas técnicas de caracterización utilizadas, pudieron facilitar ciertas evidencias de que existe cobre implantado en las obleas de silicio, entre ellos, el resultado obtenido con Raman, el cual presenta $Cu - I$ en la muestra $Si - 17$ con voltajes *pinch* bajos, que significaria que los iones estan protegidos, y lo que podría indicar que estan implantados cerca a la superficie, mientras que para $Si - 2$ Raman no encuentra cobre, pero como tiene vol-

tajes *pinch* mayores, los iones podrían haberse implantado. Pero al mismo tiempo existen trabajos que indican que si existe implantación, el pick más intenso del silicio, experimenta un desplazamiento hacia frecuencias menores, cosa que no ocurrió en este trabajo.

Capítulo 5

Conclusión

1. Se construyó un equipo PF de baja energía. Sus características eléctricas son: $L_0 = 104,3 \pm 0,2 nH$, $C_0 = 3,6 \mu F$, $R_0 = 32 \pm 1 \Omega$, $T = 4049 \pm 2 ns$, al trabajar a $V_0 = 20 kV$ se tiene un peak de corriente de $I_0 = 101,4 kA$, y una energía de banco $E_0 = 720 J$
2. Se encuentra que los rangos óptimos de trabajo del equipo PF son: Longitud del ánodo de $L = 54 mm$ a $L = 74 mm$ y presión de la cámara de descarga de $P = 2 Torr$ a $P = 4 Torr$.
3. Se encuentra que el voltaje pinch es: $V_{pinch} = 22,2 kV$, y tiempo pinch: $t_{pinch} = 940 ns$, para una presión de hidrógeno $P = 3(Torr)$ y longitud de electrodo $L = 74(mm)$.
4. Se encuentra las velocidades promedio concordantes con el modelo de Sing Lee, teniendo valores aproximados de $V = 7,9 * 10^4 m/s$ para una presión de $P = 2,5 Torr = 333,3 Pa$.
5. Las imágenes AFM, muestran una modificación inminente de la topografía de las superficies de obleas de silicio. Se verifica que a mayor número de disparos, el daño en superficie es mayor.
6. El espectro RAMAN muestra que los iones utilizados para modificar las propiedades de las superficies, en parte corresponde a iones de cobre. Así mismo evidencia la presencia de $Cu(I)$, y por lo tanto una posible implantación de iones de cobre.
7. El espectro XPS confirma la presencia de cobre oxidado en superficie, por lo tanto evidencia también la modificación de las propiedades ópticas de las obleas de silicio.

Referencias

1. Anon, 2005. CARRERA DE INGENIERÍA NUCLEAR DE PULSORES TERMONUCLEARES Fabricio Raúl Brollo.
2. <http://lppfusion.com/fusion-power/dpf-device/>
3. Lee, S., 2014. Plasma focus radiative model: Review of the lee model code. *Journal of Fusion Energy*, 33(4), pp.319 – 335.
4. Lee, S., 2014. Plasma focus radiative model: Review of the lee model code. *Journal of Fusion Energy*, 33(4), pp.319?335.
5. Niewodnicza, T.H.E.H., PLASMA-FOCUS PLASMA-FOCUS and controlled nuclear fusion.
6. E, A.A., 2010. Initial Results of Kansas State University Dense Plasma Focus. *Engineering*, (November).
7. Milanese, M. and Moroso, R., 2000. Etapa radial de un plasma focus: un estudio experimental. , 6(5), pp.4 – 7.
8. Mohamed, A.E. et al., 2012. Current sheet axial dynamics of 2,5 – kJ KSU-DPF under high-pressure regime. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 40(10PART2), pp.2736 – 2740.
9. Flow, W.P., 2006. Chapter 8 Ion Implantation Semiconductor Doping : , pp.1 – 54.
10. Veloso, F., Física experimental - Que es el plasma - Quienes somos (grupo) - Que se hace en el grupo - Que hago yo.
11. Tarifeno-Saldivia, A., 2011. Estudio Experimental De Una Descarga Plasma Focus Rápida Operada En El Rango De Decenas De Joules Emittiendo Neutrones. , p.133.
12. Khan, M.Z., Ling, Y.S. and San, W.C., 2013. Variation of Radiation Emission with Argon Gas Pressure in UM Plasma Focus with the Hollow Anode. *Open Journal of Applied Sciences*, 03(02), pp.194 – 201. Available at: [http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10,4236/ojapps.2013,32026](http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/ojapps.2013.32026).
13. Pa, N.M.P. et al., SOLAMON Resultado resumido. , pp.3 – 4. Sabato, P.J. a and Stefani, P.F.D., 2001. Detección y estudio de reacciones de hibridización de ADN en superficies . Director. Vidal, F. and Moreno, L.,

2008. Plasmones superficiales. Investigación y ciencia, pp.66?76. Available at: <http://iyc.whads.com/files/8619.pdf>.

14. Anon, Microscopia de fuerza atómica. , pp.1 – 16.
15. Lee, S., 2014. Plasma focus radiative model: Review of the lee model code. *Journal of Fusion Energy*, 33(4), pp.319 – 335.
16. <http://lppfusion.com/fusion-power/dpf-device/>
17. Haugstad, G., Overview of Atomic Force Microscopy. *Small*, pp.1 – 18.

Apéndice