

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN EN FÍSICA

**CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE UNIONES METAL-PbS
PARA EL DESARROLLO DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS**

T E S I S

Presenta

JUAN CARLOS LÓPEZ VELDERRAIN

Como requisito para obtener el título de

INGENIERO EN TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

Directores de Tesis:

Dr. Dainet Berman Mendoza

Dr. Rafael Ramírez Bon

Hermosillo Sonora, México a 22 de Marzo del 2012

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Agradecimientos

A mis padres, Lic. Francisco José López Polanco y María del Carmen Velderrain Breach y mis hermanos M.D.F. Francisco José López Velderrain y Capt. Gabriel Guillermo López Velderrain, por su total apoyo como familia y su manera de guiarme con el ejemplo que han sido para mi.

Al Dr. Rafael Ramírez Bon y Dr. Dainet Berman Mendoza, directores del presente trabajo, por su asesoría, amabilidad y paciencia brindadas durante el periodo en que trabajamos en el proyecto.

A la Universidad de Sonora por el apoyo otorgado durante los 4 años de estudio, especialmente al departamento de investigación en física, todos mis profesores y compañeros que compartiendo su conocimiento me ayudaron a desenvolverme.

Al Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Querétaro, por las condiciones de estudio brindadas, especialmente a los técnicos académicos y compañeros que me compartieron su conocimiento.

A mis amigos y personas con las que he compartido mi vida.

Resumen

Se presentan estudios I-V en películas delgadas de PbS depositadas a diferentes temperaturas y utilizando diferentes metales para determinar con cuales se obtienen los mejores contactos eléctricos. Se elabora una serie de películas delgadas de sulfuro de plomo por el método depósito por baño químico variando la temperatura de depósito desde 10 hasta 70°C con pasos de 10°C. Los metales utilizados como contactos fueron aluminio, cromo y grafito. Los contactos de cromo y aluminio fueron depositados por la técnica de d.c. sputtering y los de grafito fueron pintados manualmente. En ambos casos se utilizaron máscaras con la forma de los contactos.

Después de depositar los diferentes contactos eléctricos, se realizaron mediciones de corriente contra voltaje para determinar diferentes parámetros como resistividad y resistencia de contacto del material entre otros, a su vez también se realizaron mediciones en un cuarto totalmente oscuro y totalmente iluminado para ver el efecto que la luz tenía en la conductividad del material.

El objetivo de esta investigación es el de determinar las características eléctricas de las películas de PbS en función de la temperatura y tiempo de depósito. Para esto fue necesario primero determinar el tipo de contacto más adecuado para la caracterización eléctrica de las películas de PbS.

Abstract

I-V studies are presented in PbS thin films deposited at different temperatures and using different metals to determine which ones give the best contacts. A range of thin films of lead sulfide by the method of chemical bath deposit was produced by varying the temperature from 10 to 70°C with steps of 10°C. Aluminum, chromium and graphite were used as contacts.

After depositing each contact, I-V measurements were developed to determine different parameters such as resistivity and contact resistance of the material among others, measurements in a totally dark room and a fully enlightened room were also done to see the effect of light on the conductivity of the material.

The objective of this research is to determine the characteristics that allow us to determine which ones are the best contacts as a function of temperature and time of deposit PbS thin films in combination with the different metals used as contacts.

Tabla de contenido

Agradecimientos.....	i
Resumen.....	ii
Abstract	iii
Tabla de contenido	5
Lista de tablas y figuras.....	6
Capítulo 1 Antecedentes	10
1.1 <i>Objetivos</i>	10
1.2 <i>Estructura</i>	10
Capítulo 2 Técnicas de depósito de películas	11
2.1 <i>Introducción</i>	11
2.2 <i>Depósito por SolGel</i>	11
2.3 <i>Depósito por Sputtering</i>	12
2.4 <i>Depósito por CVD</i>	13
2.5 <i>Depósito por Baño Químico</i>	14
Capítulo 3 Sulfuro de Plomo (PbS)	15
Capítulo 4 Desarrollo experimental	17
4.1 <i>PbS por el método DBQ</i>	17
4.2 <i>Elementos de estudio</i>	18
4.3 <i>Estudios I-V</i>	19
4.4 <i>Resistencia de contacto y resistividad eléctrica de las películas de PbS</i>	20
Capítulo 5 Resultados experimentales	22
5.1 <i>Elección de contacto mediante I-V</i>	22
5.2 <i>Curvas I-V con grafito</i>	30
5.3 <i>Resistencia de contacto y resistividad</i>	46
5.4 <i>Curvas ρ-T</i>	71
5.5 <i>Curvas de corriente con luz y sin luz</i>	75
5.6 <i>Análisis de velocidad de respuesta del material</i>	90
Capítulo 6 Conclusiones y perspectivas.....	94
Bibliografía.....	96

Lista de tablas y figuras

Figura 2.1 Sputtering utilizado para el depósito de aluminio y cromo en el Centro de Investigación y estudios avanzados del IPN Unidad Querétaro.

Figura 2.2 Baño químico utilizado para el depósito de películas delgadas de sulfuro de plomo en el Centro de Investigación y estudios avanzados del IPN unidad Querétaro.

Tabla 4.1 Temperaturas y tiempos de depósito de cada una de las películas delgadas de sulfuro de plomo.

Tabla 4.2 Espesor de cada una de las películas delgadas de sulfuro de plomo determinados mediante perfilometría.

Figura 4.1 Imágenes simuladas de los depósitos de PbS sobre vidrio con contactos eléctricos.

Figura 4.2 Analizador de parámetros Agilent 4155C.

Tabla 5.1 parámetros de funcionamiento del sputtering para el depósito de contactos de aluminio.

Figura 5.1 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 15 °C por 3 horas con contactos de aluminio depositado por el método de sputtering durante 15 minutos a 80 W DC pulse.

Figura 5.2 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 20 °C por 3 horas con contactos de aluminio depositado por el método de sputtering durante 15 minutos a 80 W DC pulse.

Figura 5.3 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 25 °C por 3 horas con contactos de aluminio depositado por el método de sputtering durante 15 minutos a 80 W DC pulse.

Tabla 5.2 parámetros de funcionamiento del sputtering para el depósito de contactos de cromo.

Tabla 5.3 Valores de resistencia de contacto y resistividad para cada una de las películas

Figura 5.4 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 15 °C por 3 horas con contactos de cromo depositado por el método de sputtering durante 5 minutos a 75 W DC pulse.

Figura 5.5 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 20 °C por 3 horas con contactos de cromo depositado por el método de sputtering durante 5 minutos a 75 W DC pulse.

Figura 5.6 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 25 °C por 3 horas con contactos de cromo depositado por el método de sputtering durante 5 minutos a 75 W DC pulse.

Figura 5.7 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 15°C por 3 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

Figura 5.8 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 20°C por 3 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

Figura 5.9 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 25°C por 3 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

Figura 5.10 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 10°C por 3 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

Figura 5.11 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 10°C por 4 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

Figura 5.12 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 10°C por 5 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

Figura 5.13 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 15°C por 2 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

Figura 5.14 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 15°C por 3.5 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

Figura 5.15 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 15°C por 5 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

Figura 5.16 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 20°C por 2 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

Figura 5.17 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 20°C por 3.5 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

Figura 5.18 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 20°C por 5 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

Figura 5.19 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 30°C por 1.5 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

Figura 5.20 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 30°C por 3 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

Figura 5.50 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 50 °C por 2 horas con contactos de grafito.

Figura 5.51 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 50 °C por 3 horas con contactos de grafito.

Figura 5.52 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 60 °C por 1 horas con contactos de grafito.

Figura 5.53 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 60 °C por 2 horas con contactos de grafito.

Figura 5.54 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 60 °C por 3 horas con contactos de grafito.

Figura 5.55 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 70 °C por 1 horas con contactos de grafito.

Figura 5.56 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 70 °C por 2 horas con contactos de grafito.

Figura 5.57 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 70 °C por 3 horas con contactos de grafito.

Figura 5.58 Curvas ρ - T de películas delgadas de PbS con contactos de grafito depositadas a 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 y 70 °C con los tiempos más cortos de depósito en cada una de ellas.

Figura 5.59 Curvas ρ - T de películas delgadas de PbS con contactos de grafito depositadas a 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 y 70 °C con los tiempos medios de depósito en cada una de ellas.

Figura 5.60 Curvas ρ - T de películas delgadas de PbS con contactos de grafito depositadas a 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 y 70 °C con los tiempos más largos de depósito en cada una de ellas.

Figura 5.61 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 10°C por 4 horas, medidas en los contactos A-B con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.62 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 10°C por 4 horas, medidas en los contactos A-C con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.63 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 10°C por 4 horas, medidas en los contactos A-D con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.64 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 15°C por 3.5 horas, medidas en los contactos A-B con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.65 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 15°C por 3.5 horas, medidas en los contactos A-C con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.66 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 15°C por 3.5 horas, medidas en los contactos A-D con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.67 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 20°C por 3.5 horas, medidas en los contactos A-B con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.68 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 20°C por 3.5 horas, medidas en los contactos A-C con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.69 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 20°C por 3.5 horas, medidas en los contactos A-D con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.70 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 30°C por 3 horas, medidas en los contactos A-B con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.71 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 30°C por 3 horas, medidas en los contactos A-C con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.72 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 30°C por 3 horas, medidas en los contactos A-D con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.73 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 40°C por 3 horas, medidas en los contactos A-B con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.74 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 40°C por 3 horas, medidas en los contactos A-C con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.75 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 40°C por 3 horas, medidas en los contactos A-D con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.76 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 50°C por 2 horas, medidas en los contactos A-B con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.77 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 50°C por 2 horas, medidas en los contactos A-C con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.78 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 50°C por 2 horas, medidas en los contactos A-D con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.79 Curvas de $I-V$ para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 60°C por 2 horas, medidas en los contactos A-B con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.80 Curvas de $I-V$ para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 60°C por 2 horas, medidas en los contactos A-C con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.81 Curvas de $I-V$ para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 60°C por 2 horas, medidas en los contactos A-D con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.82 Curvas de $I-V$ para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 70°C por 2 horas, medidas en los contactos A-B con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.83 Curvas de $I-V$ para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 70°C por 2 horas, medidas en los contactos A-C con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.84 Curvas de $I-V$ para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 70°C por 2 horas, medidas en los contactos A-D con luz en rojo y sin luz en negro.

Figura 5.85 Voltaje pulsado inyectado entre las terminales A y D de cada una de las cuatro películas de PbS.

Figura 5.86 Voltaje pulsado de salida entre terminales B y C de la película de PbS depositada a 10°C durante 5 horas.

Figura 5.87 Voltaje pulsado de salida entre terminales B y C de la película de PbS depositada a 30°C durante 3 horas.

Figura 5.88 Voltaje pulsado de salida entre terminales B y C de la película de PbS depositada a 50°C durante 2 horas.

Figura 5.89 Voltaje pulsado de salida entre terminales B y C de la película de PbS depositada a 70°C durante 1 hora.

Capítulo 1

Antecedentes

1.1 Objetivos

- Depositar una serie de películas delgadas de sulfuro de plomo a diferentes temperaturas y tiempos.
- Seleccionar el mejor material para contacto mediante el estudio de las características I-V a través de las uniones Al-PbS, Cr-PbS y grafito-PbS.
- Analizar la influencia del espesor de la película de PbS sobre las características de I-V.
- Analizar la influencia del tiempo y temperatura de depósito de la película de PbS sobre su resistividad.
- Analizar la respuesta eléctrica del material cuando este se encuentra en un espacio iluminado y en un espacio de total oscuridad.

1.2 Estructura

En el primer capítulo se definen objetivos del trabajo de investigación.

En el capítulo número dos se encontrará una explicación detallada de diferentes métodos de depósito de materiales. Donde con ayuda de la bibliografía se tratará dar una idea precisa al lector del funcionamiento y las características que componen a cada una de estas técnicas.

Una vez conocidas las técnicas, el capítulo número tres abordará de una manera clara la explicación de detalles técnicos, eléctricos, químicos y morfológicos del material a investigarse, en este caso, el sulfuro de plomo.

El capítulo número cuatro, el lector podrá encontrarse con una explicación detallada del desarrollo experimental, donde se abordarán claramente los temas relacionados con la forma de depositarse del PbS con el método utilizado, así como los elementos a estudiarse durante la práctica.

El capítulo cinco, será básicamente para que el lector conozca los resultados obtenidos durante dicha investigación científica.

Y para finalizar, las conclusiones y perspectivas de este trabajo podrán ser encontradas en el capítulo número 6.

Capítulo 2

Técnicas de Depósito de Películas

2.1 Introducción

El estudio, caracterización y fabricación de materiales semiconductores han captado gran interés por su aplicación en el desarrollo de dispositivos optoelectrónicos. De estos, los más investigados han sido los materiales de los grupos II-VI y IV-VI por su facilidad de aplicación en el área de los dispositivos optoelectrónicos [7]. El material más estudiado entre los materiales que componen el grupo IV-VI es el PbS, un semiconductor binario con gap de 0.37eV a temperatura ambiente y constante dieléctrica de 170 con múltiples aplicaciones dentro del campo de la ciencia y la tecnología tales como celdas solares, transistores de película delgada, detectores de infrarrojo, fotorresistencias, sensores de humedad y temperatura entre otros [3]. Es posible crecer películas delgadas de PbS mediante diferentes métodos entre los que se pueden mencionar depósito por sol gel, depósito químico de vapor (CVD, chemical vapor deposition) Sputtering y depósito en baño químico (CBD, chemical bath deposition) [2,5,6] como las más importantes, en este trabajo se utilizó la técnica de depósito por baño químico (CBD) debido a que presenta las ventajas de ser probablemente el método más simple disponible para este propósito, todo lo necesario es un vaso de precipitado que contenga la solución química, el sustrato en el que se requiere hacer el depósito y un controlador de temperatura. Esta es la técnica más comúnmente reportada en la literatura para el depósito de películas de PbS. Se ha encontrado que las propiedades eléctricas, ópticas, morfológicas y estructurales de películas de PbS depositadas por el método CBD tienen una alta dependencia en las condiciones de crecimiento [4]. Al variar los tiempos y temperaturas de depósito del material, se espera obtener el comportamiento de diferentes parámetros como resistividad, conductividad, ancho de banda de energía prohibida, etc.

2.2 Depósito por SolGel

El método sol-gel se desarrolló desde hace más de 40 años como una alternativa tecnológica para la preparación de vidrios y cerámicos a temperaturas considerablemente bajas. El sistema inicial representa una solución donde diferentes procesos de polimerización o poli condensación conllevan a la formación gradual de la red de fase sólida.

El proceso sol-gel se clasifica dentro de los llamados procedimientos suaves de síntesis de materiales, muchas veces con base de óxidos metálicos. Con el tiempo este proceso ha sido mejorado y reorientado para obtener diversos materiales con tamaño de partícula hasta del orden de nanómetros, los cuales presentan un gran potencial tecnológico.

Este proceso consiste básicamente en la formación de redes compuestas por elementos inorgánicos obtenidos a través de dos reacciones químicas simultáneas que son la hidrólisis y condensación, éstas se inician a partir de una solución homogénea de alcóxido, solvente, agua y un catalizador, este último puede o no, ser usado, y lo anterior depende básicamente del tipo de material y su aplicación final.

La primera etapa de proceso es la hidrólisis del alcóxido, y puede ser catalizada por medio de un ácido o una base, en esta etapa se obtienen soles, es decir una suspensión de aspecto similar a una disolución, que contiene partículas de tamaño inferior a 100 nm y se forman grupos silanol (Si OH) al tiempo en que se libera alcohol correspondiente (ROH). Los grupos silanoles comienzan a polimerizar por medio de la condensación, así se van formando estructuras tridimensionales unidad por enlaces siloxano (Si-O-Si) al irse eliminando el agua y el alcohol. Al final de la segunda etapa de condensación se forma un gel sólido, más o menos compacto y denso, lo cual dependerá de las condiciones de secado. Las estructuras tanto del sol como el gel, formados en las primeras etapas, dependen fuertemente de las condiciones de la reacción inicial como son la temperatura, el tipo de catalizador, así como, de las velocidades relativas de hidrólisis y de la condensación.

Al tiempo entre la formación del gel durante el secado se le conoce como envejecimiento, siendo éste también un parámetro importante. Un gel no es estático durante el envejecimiento ya que continúan ocurriendo simultáneamente las reacciones de hidrólisis y condensación. Además ocurre una remoción de solvente a causa del encogimiento del gel y también puede ocurrir una disolución y re precipitación de partículas. Estos fenómenos también afectan a las propiedades químicas y estructurales del gel. Un parámetro que sin duda afecta la estructura de los productos es el proceso y condiciones de secado. El secado por evaporación convencional de un gel induce presión capilar asociada entre la interfase líquido-vapor con un poro [5].

2.3 Depósito por Sputtering

La técnica de depósito por Sputtering ó pulverización catódica en alto vacío, es actualmente una de las más utilizadas en el tratamiento de paneles de vidrio de grandes dimensiones. En este apartado se presentan los principios de la deposición de capas delgadas utilizadas como contactos mediante sputtering.

Consiste principalmente en un proceso de bombardeo iónico, que consigue la deposición en fase vapor, sobre un sustrato de vidrio del material bombardeado. En esta técnica, los iones formados en un plasma son acelerados hacia el material que se desea depositar, mediante un campo eléctrico. El plasma está formado por gases de proceso, ionizados por el fuerte campo eléctrico. El alto voltaje entre el cátodo y el ánodo provoca que los iones del gas de proceso golpeen el blanco con la energía suficiente para arrancar átomos de la superficie del cátodo mediante un proceso de transferencia de momento. Cuando el ión golpea la superficie del material, transfiere parte de su energía a los átomos que lo forman y se produce entonces una colisión en cascada. Las múltiples colisiones hacen posible que algunos átomos del material adquieran la suficiente energía para abandonar la

superficie, alcanzar el sustrato y adherirse a él. La mayor parte de la energía proporcionada por los iones incidentes se transforma en calor, siendo este disipado mediante un circuito de refrigeración que evita el sobrecalentamiento del cátodo.

Los gases de proceso utilizados son argón y oxígeno. La función del oxígeno será la de variar su concentración en el proceso, poder obtener el material depositado con mayor proporción de oxígeno o menor, lo cual incidirá en las finales características de las capas [2].



Figura 2.1 Sputtering utilizado para el depósito de aluminio y cromo en el Centro de Investigación y estudios avanzados del IPN Unidad Querétaro.

2.4 Depósito por CVD

Se puede definir el proceso de CVD como la reacción de uno o varios compuestos en forma de gas o vapor para dar un producto sólido. Las fuentes precursoras de estos productos generalmente están en forma de gas o líquido. En ambos casos, los reactivos(gas o vapor) han de ser arrastrados a la cámara de reacción en la proporción adecuada para producir el material a través de la reacción correspondiente. Los gases precursores de este producto son alimentados a través de la puerta de entrada al reactor. Al mismo tiempo, los subproductos gaseosos de la reacción son eliminados a través de la puerta de salida mediante un sistema de evacuación adecuado.

Un aspecto importante de la reacción de CVD es la necesidad de activar los gases precursores para que se produzca la reacción, ya que en condiciones normales de operación (presión y temperatura) la velocidad de reacción suele ser

muy baja. Es precisamente el método empleado en la activación lo que distingue las diferentes técnicas de CVD: activación por temperatura, por un plasma o descarga eléctrica entre dos electrodos, por la radiación electromagnética, etc., aunque en la mayoría de los casos es necesario siempre una cierta contribución térmica para conseguir la activación total de los reactivos [6].

2.5 Depósito por Baño Químico

El método de depósito por baño químico (CBD) fue descrito por primera vez en 1869, y ha sido utilizada desde entonces para el depósito de películas de diferentes semiconductores. Es probablemente el método más simple disponible para este propósito, todo lo necesario es un vaso de precipitado que contenga la solución química, el sustrato en el que se requiere hacer el depósito y un controlador de temperatura[1].



Figura 2.2 Baño químico utilizado para el depósito de películas delgadas de sulfuro de plomo en el Centro de Investigación y estudios avanzados del IPN unidad Querétaro.

Capítulo 3

Sulfuro de Plomo (PbS)

El sulfuro de plomo (PbS), un semiconductor binario del grupo IV-VI con gap de 0.37eV a temperatura ambiente y constante dieléctrica de 170, es un semiconductor con múltiples aplicaciones dentro del campo de la ciencia y la tecnología tales como detectores de infrarrojo, fotorresistencias, celdas solares y transistores de películas delgadas (TFT) [3, 17, 22, 23]. Por esta razón, diversos grupos de investigación tienen un gran interés en el desarrollo y estudio de este material.

Es posible crecer películas delgadas de PbS mediante la técnica de depósito por Baño Químico (CBD) siendo bien conocido que es el método más conveniente. Se ha encontrado que las propiedades del depósito químico de las películas delgadas de PbS tienen una alta dependencia en las condiciones de crecimiento, al los parámetros de depósito, como lo son: tiempo de reacción, temperatura, pH y la presencia de impurezas en la solución [4, 8,10,14].

Las películas delgadas de sulfuro de plomo han captado gran interés de estudio desde los años 50's por sus propiedades únicas de detección en el dominio infrarrojo (IR). En este momento es aceptado que las películas delgadas de sulfuro de plomo depositadas por el método del baño químico son de tipo p debido a los procesos de oxidación que tiene lugar después de remover las películas del baño de depósito [15].

Como aplicaciones del sulfuro de plomo se pueden mencionar transistores de películas delgadas (TFTs, thin film transistors), los cuales son usados en muchas aplicaciones electrónicas, aunque los TFTs de silicio amorfo son los más comunes en matrices de cristal líquidas [22]. Desde antiguas investigaciones en TFTs, los metales calcogenuros como el Cu_2S , CdS y CdSe han sido usados en capas de dispositivos semiconductores tipo MOS (Metal Oxide Semiconductor). El sulfuro de plomo es otra película basada en calcogenuros que ha sido estudiada por años en aplicaciones de dispositivos TFTs. Por ejemplo, se ha encontrado que el efecto de campo en TFTs basados en PbS puede ser usado para estimular la fotoconductividad y señal en proporción al ruido en dispositivos basados en PbS. Así, la fotosensibilidad de los fotodetectores basados en PbS pueden ser mejorados ajustando el voltaje de compuerta en el TFT [22].

Así mismo, en esta etapa del desarrollo de la industria y tecnología de dispositivos de celdas solares fotovoltaicas, uno de los problemas más importantes es el costo de los materiales ó a su vez otro aspecto importante es el ecológico: los dispositivos para la producción de energía limpia deben corresponder a dispositivos de tecnología limpia. Uno de los métodos baratos, simples y eficientes

con respecto al depósito de películas delgadas es el de depósito por baño químico tradicionalmente usado para preparar películas delgadas de calcogenuros, CdS, PbS y CdSe en particular. La mayoría de estos semiconductores tienen propiedades interesantes para aplicaciones en dispositivos, incluyendo los fotovoltaicos. El PbS es un semiconductor de gap estrecho, lo cual lo hace diferente de la mayoría de los semiconductores en carácter de temperatura y dependencia de deformación del band gap; es sabido que el PbS es un buen candidato para dispositivos nano estructurados. Por otra parte, el efecto de generación múltiple de excitones fue recientemente descubierto en nano estructuras de PbS, lo cual es muy prometedor para aplicaciones con celdas solares [23].

Capítulo 4

Desarrollo experimental

4.1 PbS por el método DBQ

Para la elaboración del sulfuro de plomo por el método de baño químico la solución es preparada en un vaso de precipitados de 100ml con la adición secuencial de 5ml a 0.5M de acetato de plomo, 5ml de hidróxido a 2M de sodio, 6ml de thiourea a 1M y 2ml de trietanolamina a 1M. La solución se completa con agua desionizada para un volumen total de 100ml [3].

Se elaboraron 24 películas delgadas variando las temperaturas y los tiempos como se puede apreciar en la tabla 4.1

Material	Temperatura de depósito (°C)	Tiempo de depósito (horas)
PbS	10	3
PbS	10	4
PbS	10	5
PbS	15	2
PbS	15	3.5
PbS	15	5
PbS	20	2
PbS	20	3.5
PbS	20	5
PbS	30	1.5
PbS	30	3
PbS	30	4
PbS	40	1.5
PbS	40	3
PbS	40	4
PbS	50	1
PbS	50	2
PbS	50	3
PbS	60	1
PbS	60	2
PbS	60	3
PbS	70	1
PbS	70	2
PbS	70	3

Tabla 4.1 Temperaturas y tiempos de depósito de cada una de las películas delgadas de sulfuro de plomo.

A las 24 películas depositadas se les hizo el estudio de perfilometría para determinar su espesor. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.2, donde podemos apreciar un buen comportamiento en cuanto al grosor de las

películas, ya que como es de esperarse, las películas fueron depositándose más gruesas conforme el tiempo y la temperatura de depósito se incrementaban.

Material	Temperatura de depósito (°C)	Espesor (nm)
PbS	10	53
PbS	10	105
PbS	10	140
PbS	15	67.3
PbS	15	109.7
PbS	15	121
PbS	20	173
PbS	20	220
PbS	20	355
PbS	30	187
PbS	30	202
PbS	30	215
PbS	40	288
PbS	40	301
PbS	40	315
PbS	50	179
PbS	50	320
PbS	50	361
PbS	60	182
PbS	60	302
PbS	60	440
PbS	70	193
PbS	70	323
PbS	70	366

Tabla 4.2 Espesor de cada una de las películas delgadas de sulfuro de plomo determinados mediante perfilometría

Las películas resultantes fueron homogéneas, muy lisas y reflejantes, es conocido que son películas policristalinas con estructura cúbica.

4.2 Elementos de estudio

La serie de películas delgadas de sulfuro de plomo (PbS) fueron depositadas con los tiempos y temperaturas mostrados en la tabla 4.1. En la figura 4.1 se muestra una clara imagen de una perspectiva lateral y por encima de las películas de PbS depositadas sobre vidrio y a su vez los seis contactos denominados A, B, C, D y E los cuales se encuentran separados por 0.3 cm cada uno de ellos, esto medido de centro a centro de cada uno de los contactos. Los contactos miden 0.15cm de ancho por 2.2cm de largo.

Los materiales de contacto utilizados fueron el aluminio, el cromo y el grafito, los cuales fueron colocados con ayuda de una mascarilla de metal que se pone por encima de la película delgada y su función es la de cubrir las zonas en las que no se pretende depositar el material.

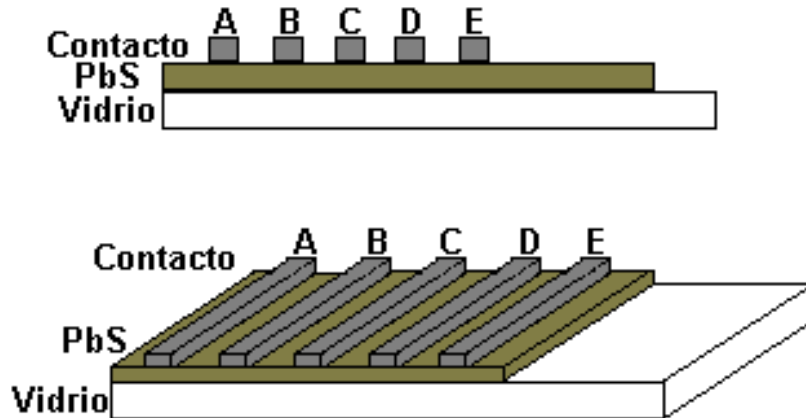


Figura 4.1 Imágenes simuladas de los depósitos de PbS sobre vidrio con contactos eléctricos.

4.3 Estudios I-V

Al polarizar una unión metal-semiconductor por medio de una diferencia de potencial V , puede circular sobre ella una corriente eléctrica I que es función del voltaje aplicado. Si la unión del contacto es óhmico, es decir, una unión lineal, simétrica y no rectificadora, es posible determinar la resistencia del sistema de la relación I-V, la cual es lineal, de acuerdo a la ley de Ohm. Si la unión es una barrera Schottky, es decir, una unión metal-semiconductor con características de rectificador tales como las de un diodo, es posible determinar el coeficiente de idealización y la corriente de saturación de la curva I-V. El analizador de parámetros Agilent 4155C que se muestra en la figura 4.2 es utilizado para obtener la corriente eléctrica como función del voltaje de polarización. Las mediciones fueron realizadas a diferentes intervalos de voltaje de polarización y a temperatura ambiente, cabe señalar que estas mediciones fueron realizadas en un ambiente oscuro.



Figura 4.2 Analizador de parámetros Agilent 4155C

4.4 Resistencia de contacto eléctrico y resistividad eléctrica de las películas de PbS.

La resistencia de contacto y la resistividad en películas delgadas son dos parámetros muy importantes en el estudio eléctrico de las mismas. Estos parámetros son prácticamente sencillos de obtener si ya se cuenta con un estudio de curvas I-V. De acuerdo con la Ley de Ohm, la relación entre el voltaje y corriente a través de una muestra de resistencia eléctrica R es,

$$V = IR \quad (4-1)$$

De tal manera que en una curva experimental de I-V medida en esta muestra, la pendiente " m ", de dicha curva será la que nos de la resistencia de la película medida mediante la formula

$$R = 1/m \quad (4-2)$$

Es decir, que la resistencia será tomada como el inverso de la pendiente de la curva I-V. La resistencia eléctrica se midió entre el primer contacto A y los subsecuentes B, C, D, E, etc., mostrados en la Fig. 4.1, obteniéndose un conjunto de resultados para la resistencia eléctrica en función de la distancia entre electrodos L . Una vez obtenido este parámetro, se procede a hacer una gráfica de resistencia contra distancia de los contactos, donde para cada una de las distancias de estos contactos tendremos una resistencia dada por la fórmula anteriormente mencionada.

Una vez que contamos con nuestra curva $R(L)$, es decir, la curva dada al ser graficados los valores de longitud en el eje " X " y resistencia en el eje " Y ", la cual de acuerdo a la ecuación (4-3)

$$R(L) = \frac{\rho}{A}L + R_c \quad (4-3)$$

nos permite obtener la resistividad " ρ " mediante el despeje de la formula

$$m = \rho/A \quad (4-4)$$

es decir

$$\rho = mA \quad (4-5)$$

donde A es el área obtenida de la multiplicación de el grosor de la película medida por la longitud del contacto sobre ella.

De acuerdo a la función de la fórmula de $R(L)$ para obtener la resistencia de contacto R_c , es decir, la resistencia que opone el material de contacto sobre el flujo de la corriente, es necesario simplemente ver el punto de intersección de la curva $R(L)$ con el eje de " Y " del gráfico.

De esa forma es posible obtener estos importantes parámetros de caracterización eléctrica de películas delgadas. En este trabajo de investigación la obtención de dichos valores fueron respaldados por el uso del software para el desarrollo de gráficas OriginPro 8, las cuales se pueden observar en el tema de resistencia de contacto y resistividad del capítulo siguiente.

Capítulo 5

Resultados experimentales

5.1 Elección de contacto mediante I-V

Se analizaron eléctricamente mediante curvas *I-V* nueve películas depositadas por CBD durante 3 horas a 15, 20 y 25 grados con 220nm de espesor cada una de ellas, donde a las primeras tres se les depositaron contactos de aluminio, a las siguientes tres se les depositaron contactos de cromo y a las últimas tres se les depositaron contactos de grafito todos ellos separados 0.3 cm cada uno (medida tomada de centro a centro de cada contacto).

Al analizar los resultados de las mediciones *I-V* de las primeras tres películas con contactos de aluminio mostrados en las figuras 5.1, 5.2 y 5.3, se puede apreciar que las corrientes obtenidas después de hacer el barrido de voltaje de -10 volts a 10 volts, todos los valores corresponden al orden de los nano amperes.

Es de gran importancia notar que mientras la película fue depositada con más temperatura ésta se volvió más conductora, es decir, que en la película depositada a 15°C el valor de corriente máximo obtenido al aplicar 10 volts fue de entre 20 nA y 45 nA dependiendo estos valores de la lejanía entre contactos, es decir, mientras más larga la distancia entre contactos el valor de corriente medido fue menor. Al comparar estos resultados con los de la película depositada a 20°C el cambio fue notorio ya que en esta las medidas de corriente fueron desde los 40 nA a los 100 nA respetándose en esta también el hecho de que mientras la distancia entre contactos fue mayor, la corriente medida fue disminuyendo. En cuanto a la película depositada a 25°C, en ésta también se respetó el hecho de que al incrementar la distancia entre los contactos la corriente disminuye, pero en este caso aunque la corriente fue del mismo orden de los nano amperes, se notó un gran aumento, ya que en el valor máximo del barrido de voltaje se obtuvieron corrientes desde alrededor de los 100 nA hasta los 500 nA.

Es importante mencionar que aunque los valores de corriente obtenidos sean pequeños, responden de manera esperada ya que al ir incrementando la temperatura de depósito del material obtuvimos corrientes mayores en las mediciones de todas ellas. Pero el contacto dejó mucho que desear en la claridad de las gráficas, ya que se notan con mucho ruido, en especial las de las películas depositadas a 15 y 20 grados.

El aluminio fue depositado por el método de sputtering utilizando una fuente DC pulsado con los parámetros mostrados en la tabla 5.1 durante un tiempo de 15 minutos para cada uno de los cinco contactos.

Presión inicial	2×10^{-6} Torr
Presión de trabajo	5×10^{-2} Torr
Potencia	50 W
Flujo	20 ccm

Tabla 5.1 parámetros de funcionamiento del sputtering para el depósito de contactos de aluminio.

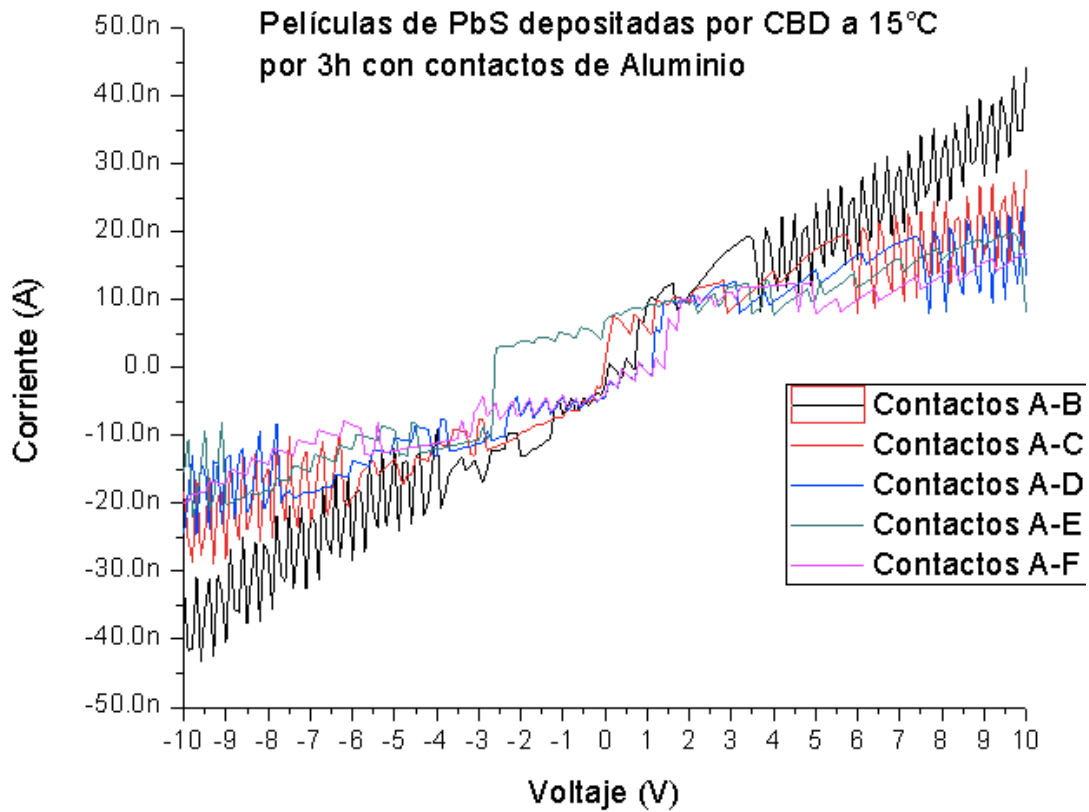


Figura 5.1 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 15 °C por 3 horas con contactos de aluminio depositado por el método de sputtering durante 15 minutos a 80 W DC pulse.

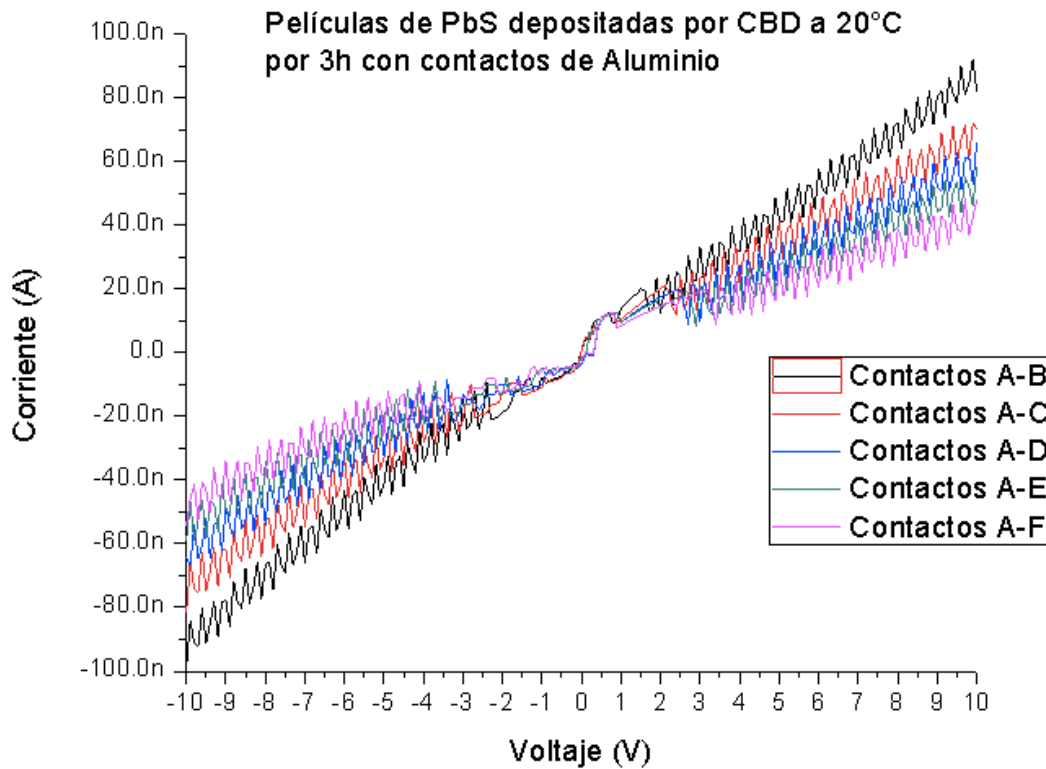


Figura 5.2 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 20 °C por 3 horas con contactos de aluminio depositado por el método de sputtering durante 15 minutos a 80 W DC pulse.

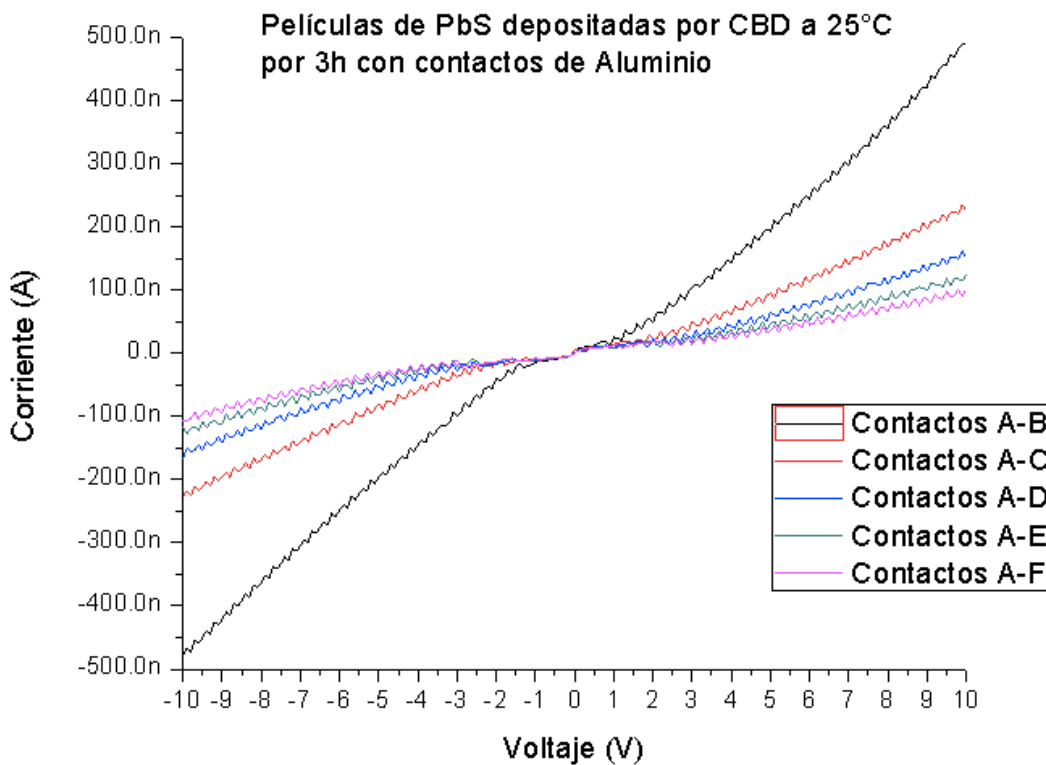


Figura 5.3 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 25 °C por 3 horas con contactos de aluminio depositado por el método de sputtering durante 15 minutos a 80 W DC pulse.

En las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 se presentan los resultados obtenidos para las películas delgadas con contactos de cromo donde se puede apreciar claramente que estas presentan menos ruido eléctrico que las estudiadas con contactos de aluminio, presentando la misma respuesta al ir aumentando la distancia entre contactos, pero en estas notamos que no existe mucha diferencia entre las corrientes medidas en las películas depositadas a 15 y 20 grados, en ambas se observan medidas máximas de corriente a 10 volts de entre 50 nA y 300 nA. Pero si es posible detectar un cambio en las medidas de la película depositada a 25°C, la cual en el voltaje máximo de 10 volts se midieron corrientes de entre 10 nA y 80 nA, es decir, mucho más bajas que en las dos películas previas.

El cromo fue depositado por el método de sputtering utilizando una fuente DC pulsado con los parámetros mostrados en la tabla 5.2 durante un tiempo de 5 minutos para cada uno de cinco contactos.

Presión inicial	6×10^{-6} Torr
Presión de trabajo	5×10^{-2} Torr
Potencia	75 W
Flujo	20 ccm

Tabla 5.2 parámetros de funcionamiento del sputtering para el depósito de contactos de cromo.

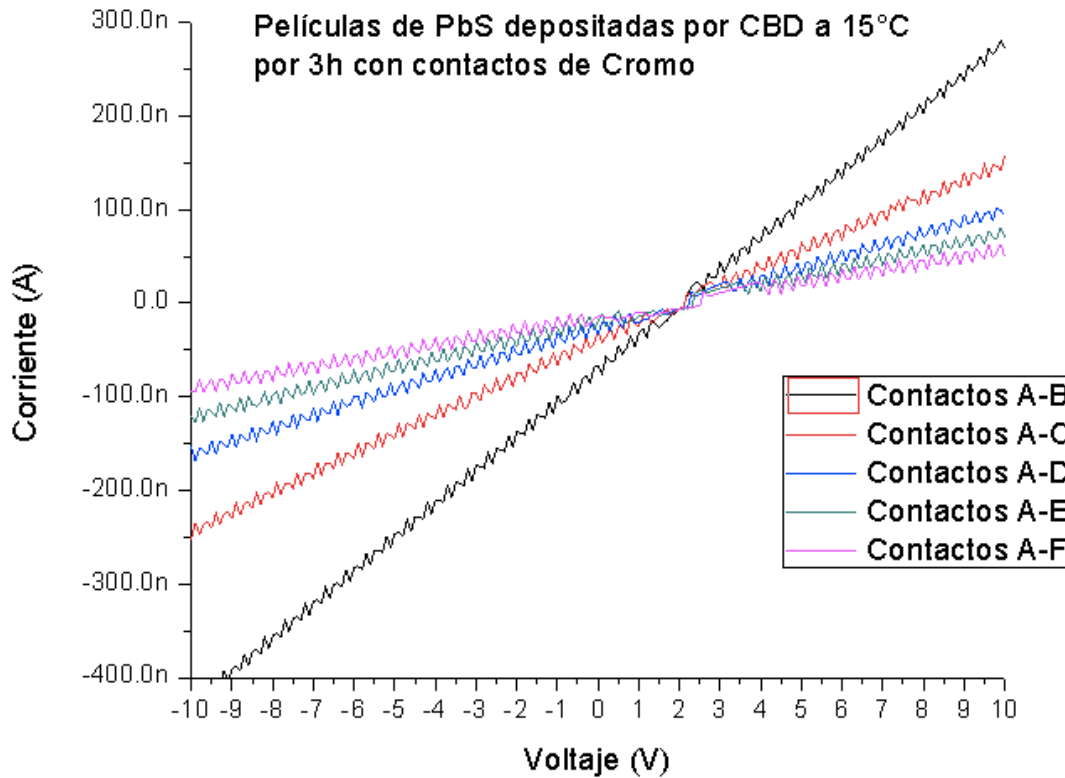


Figura 5.4 Curvas I - V de película delgada de PbS depositada por CBD a 15 °C por 3 horas con contactos de cromo depositado por el método de sputtering durante 5 minutos a 75 W DC pulse.

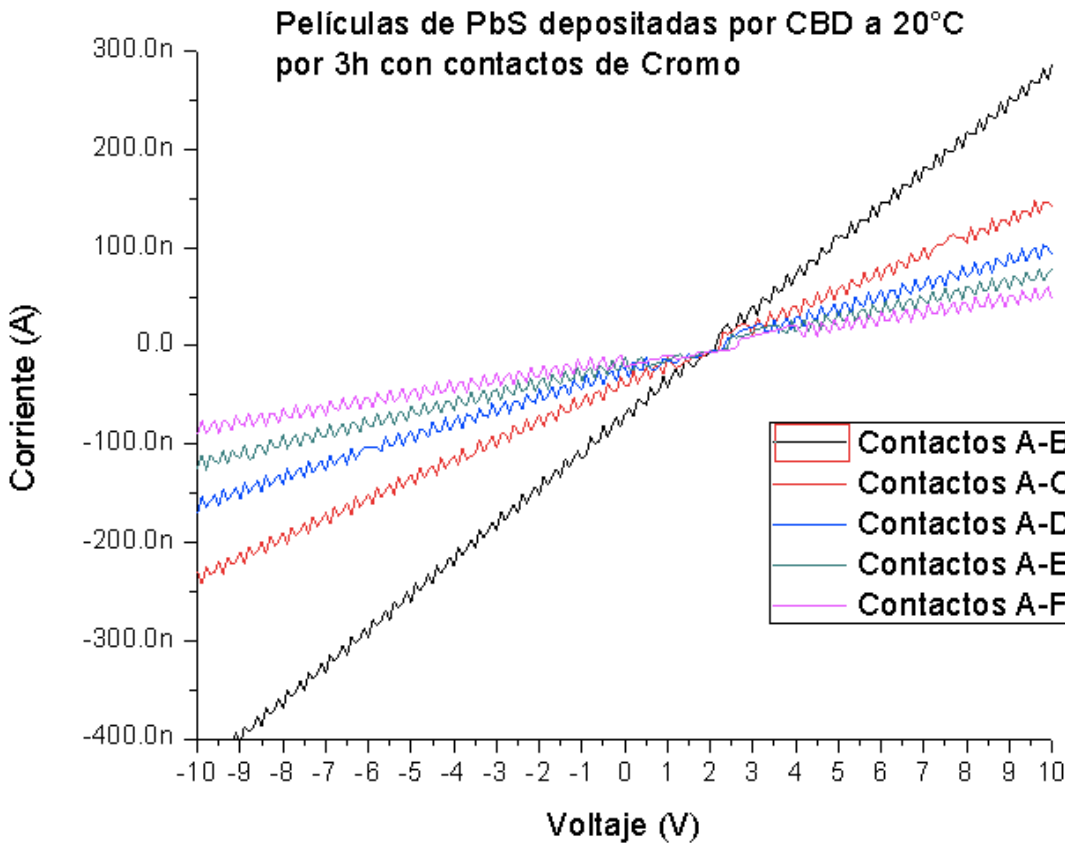


Figura 5.5 Curvas I - V de película delgada de PbS depositada por CBD a 20 °C por 3 horas con contactos de cromo depositado por el método de sputtering durante 5 minutos a 75 W DC pulse.

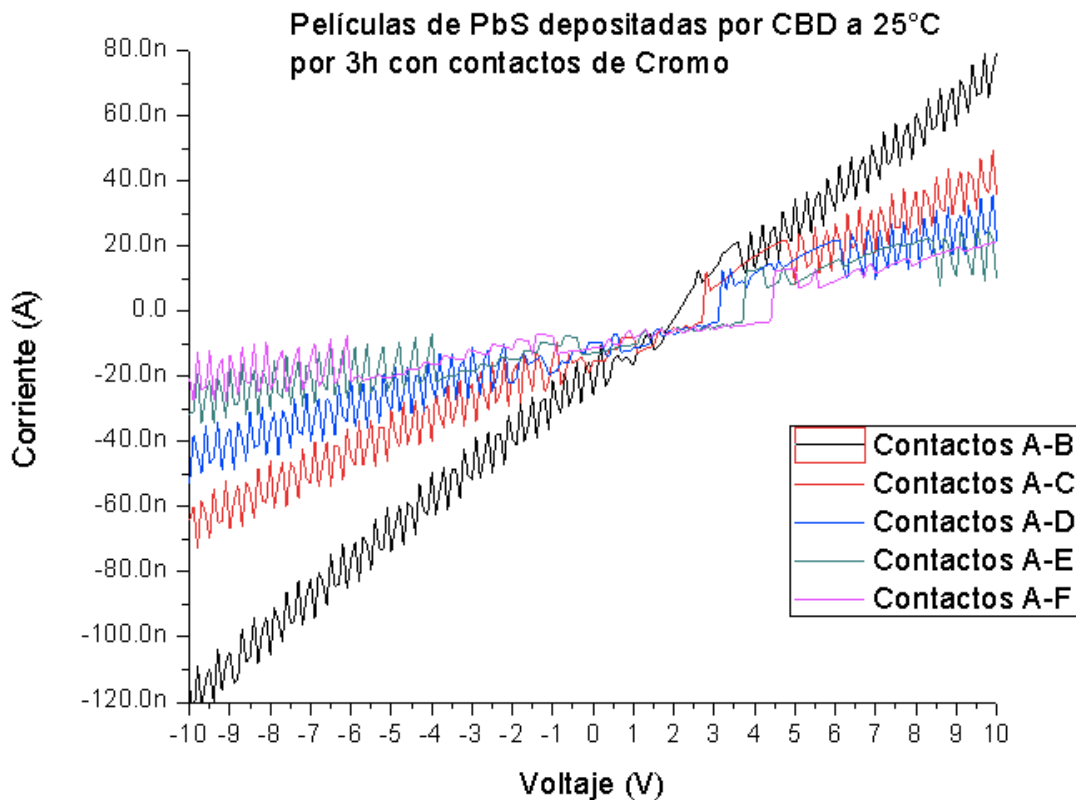


Figura 5.6 Curvas I - V de película delgada de PbS depositada por CBD a 25 °C por 3 horas con contactos de cromo depositado por el método de sputtering durante 5 minutos a 75 W DC pulse.

En las figuras 5.7, 5.8 y 5.9 se presentan los resultados obtenidos para las películas delgadas con contactos de grafito donde se puede apreciar claramente que estas presentan el mejor comportamiento comparándolas con las anteriormente estudiadas con contactos de aluminio y cromo, esto puede ser claramente observado al ver que las películas estudiadas presentan un buen comportamiento óhmico con muy poco ruido en todas ellas.

Pero independientemente del poco ruido mostrado, es muy importante darse cuenta que al aumentar la temperatura de depósito tan solo de 15 a 20 grados, se logró aumentar también el orden de la corriente generada, es decir, mientras que en la película depositada a 15°C en el voltaje mayor del barrido se obtuvieron valores de corriente de entre 200 nA y 950 nA, en las de la película depositada a 20 °C los valores obtenidos en ese mismo voltaje fueron de entre 1 μ A y 6 μ A.

Al comparar las mediciones I - V de esas dos películas depositadas a 15 y 20 grados con las de la película depositada a 25°C puede notarse que esta última antes de que el barrido de voltaje llegue a los 4 volts suministrados por la fuente de tensión, las corrientes obtenidas ya superan los 20 μ A, siendo este el máximo valor de corriente que el equipo de medición puede detectar.

El grafito fue depositado de forma manual con tinta de grafito la cual una vez depositada se dejó secar durante 24 horas para posteriormente hacer sus mediciones.

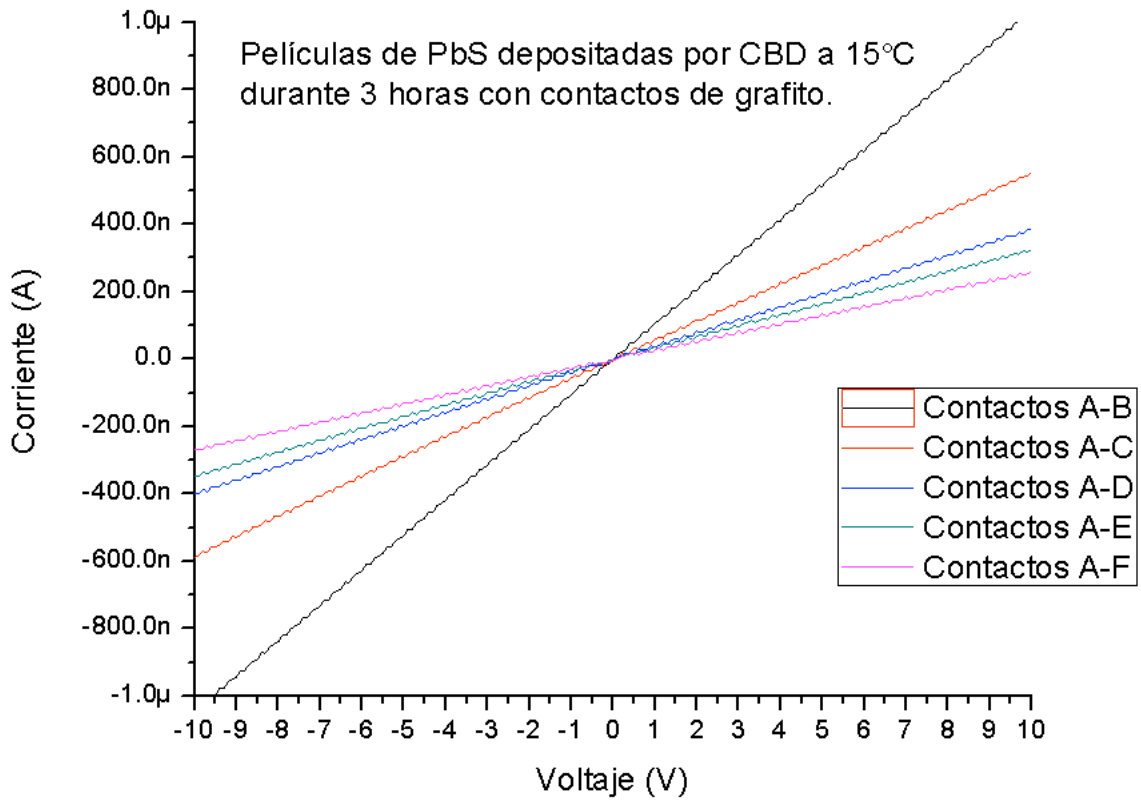


Figura 5.7 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 15°C por 3 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

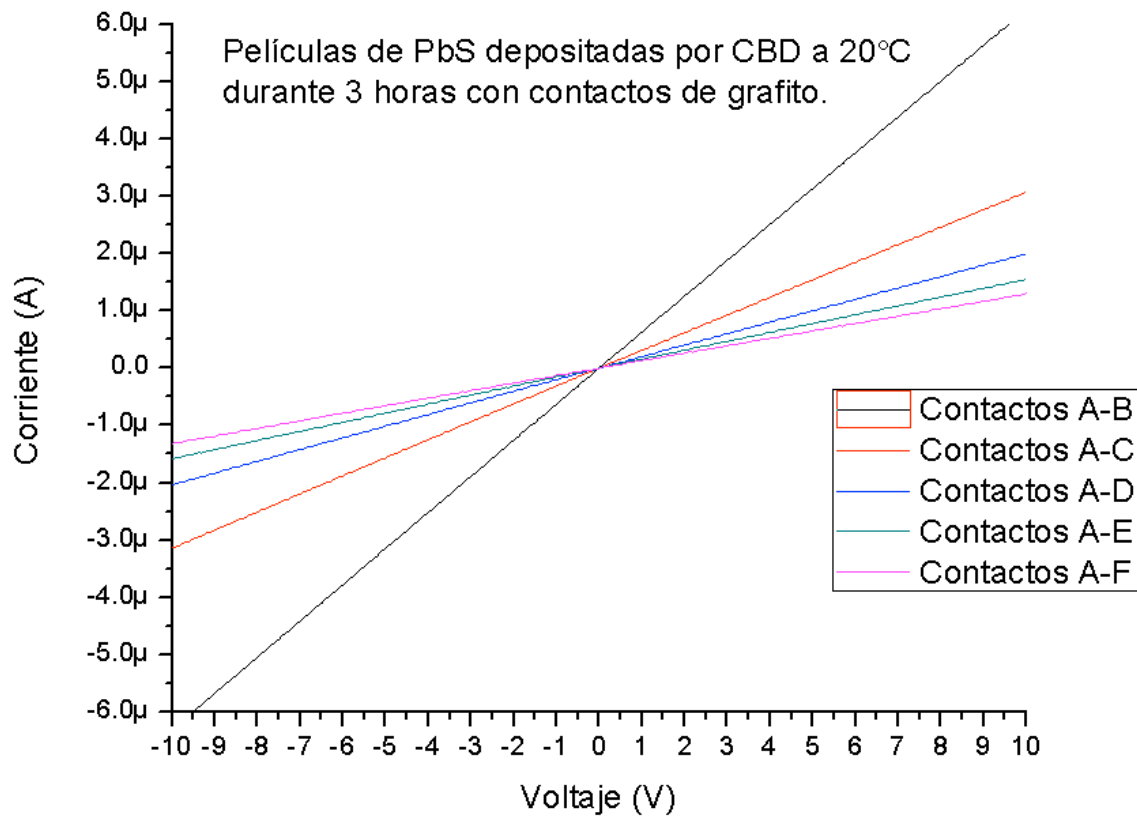


Figura 5.8 Curvas I - V de película delgada de PbS depositada por CBD a 20°C por 3 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

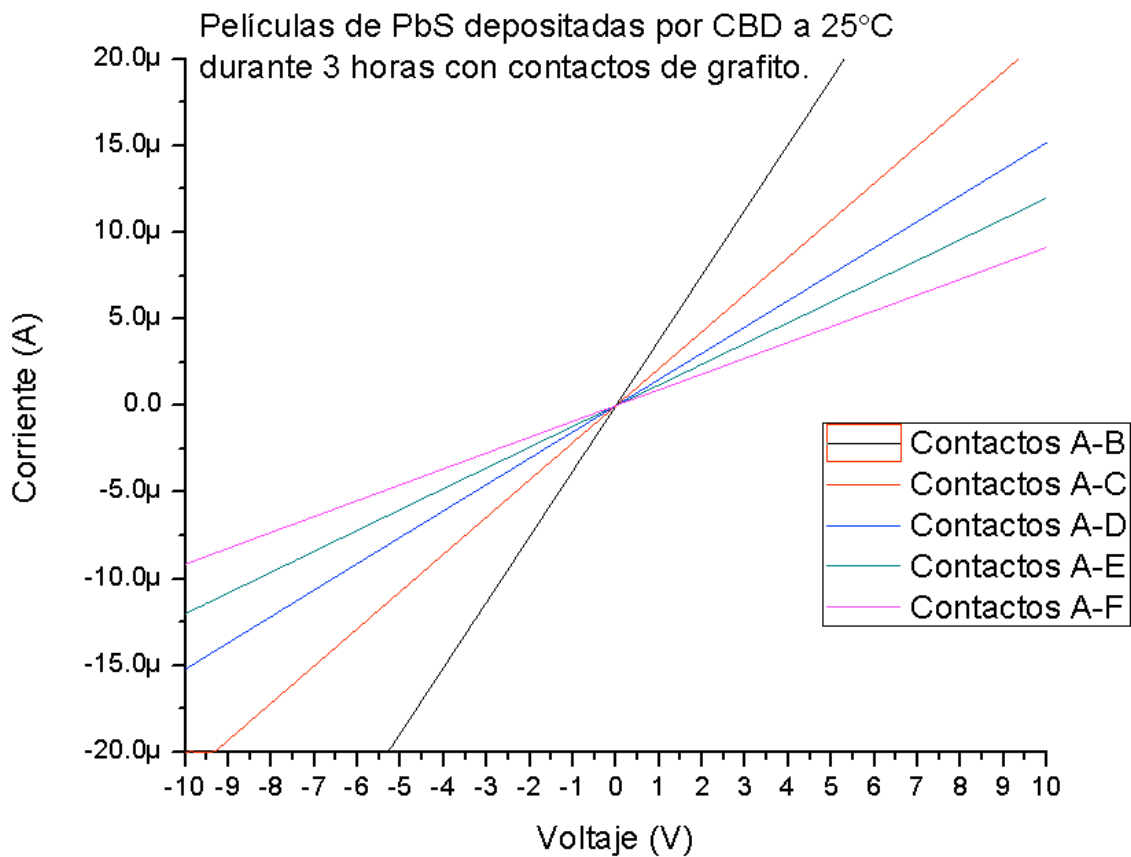


Figura 5.9 Curvas I - V de película delgada de PbS depositada por CBD a 25°C por 3 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

Al hacer las mediciones a las 9 películas delgadas de sulfuro de plomo antes detalladas, sin duda alguna las películas con contactos de grafito fueron las que despertaron el total interés para llevar a cabo mediciones más detalladas con este material como contacto.

5.2 Curvas I - V con grafito

Una vez seleccionado el grafito como nuestro material de contacto, este se colocó de manera manual con tinta conductora de grafito en las 24 películas delgadas de sulfuro de plomo depositadas a las temperaturas y tiempos previamente detallados en el capítulo anterior y mostrados en la tabla 4.1

En las figuras 5.10, 5.11 y 5.12 se muestran las gráficas de I - V de las películas de PbS con contactos de grafito depositadas a 10 °C con tiempos de depósito de 3, 4 y 5 horas respectivamente. Donde al compararlas, podemos notar como mediante el incremento del tiempo de depósito la película se fue observando más conductora y con menos ruido.

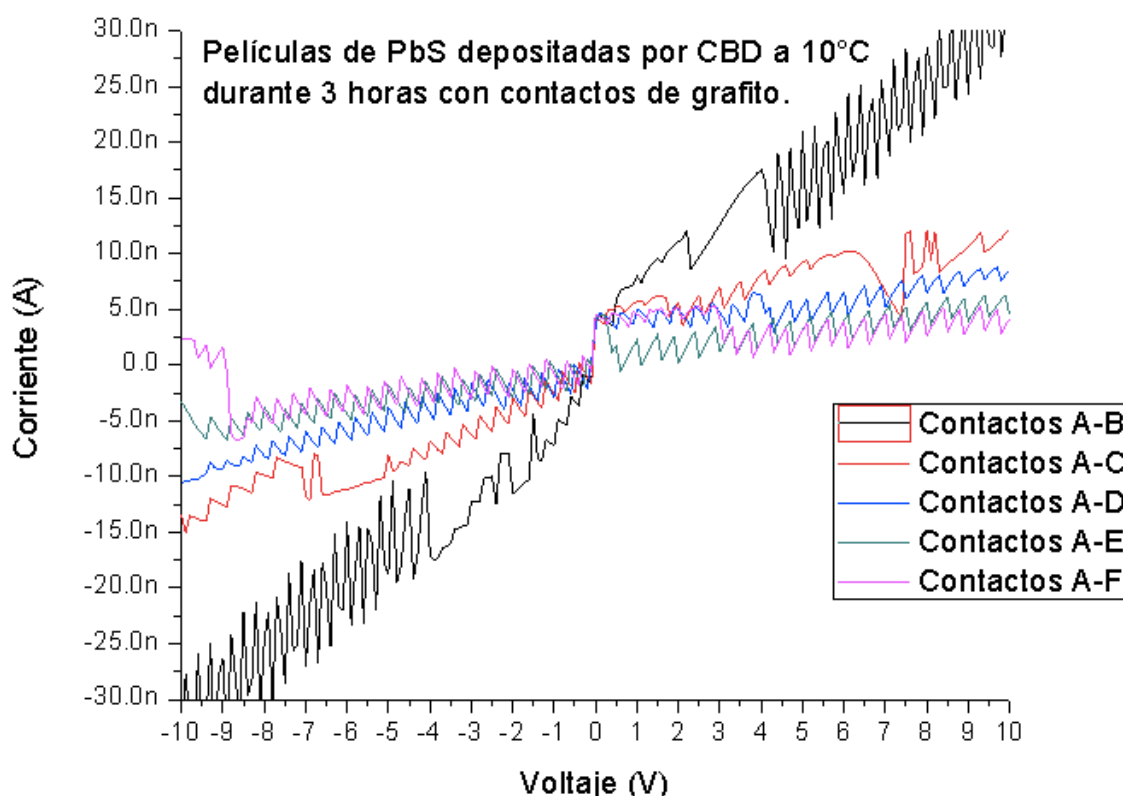


Figura 5.10 Curvas I - V de película delgada de PbS depositada por CBD a 10°C por 3 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

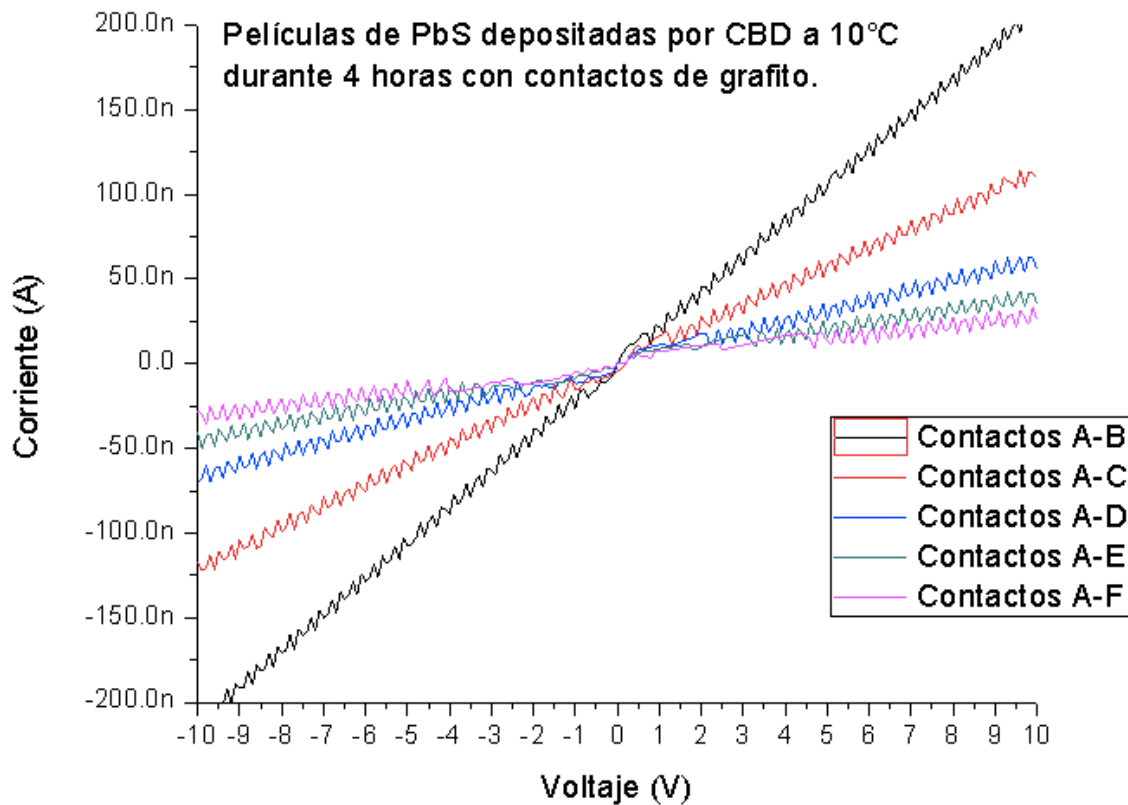


Figura 5.11 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 10°C por 4 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

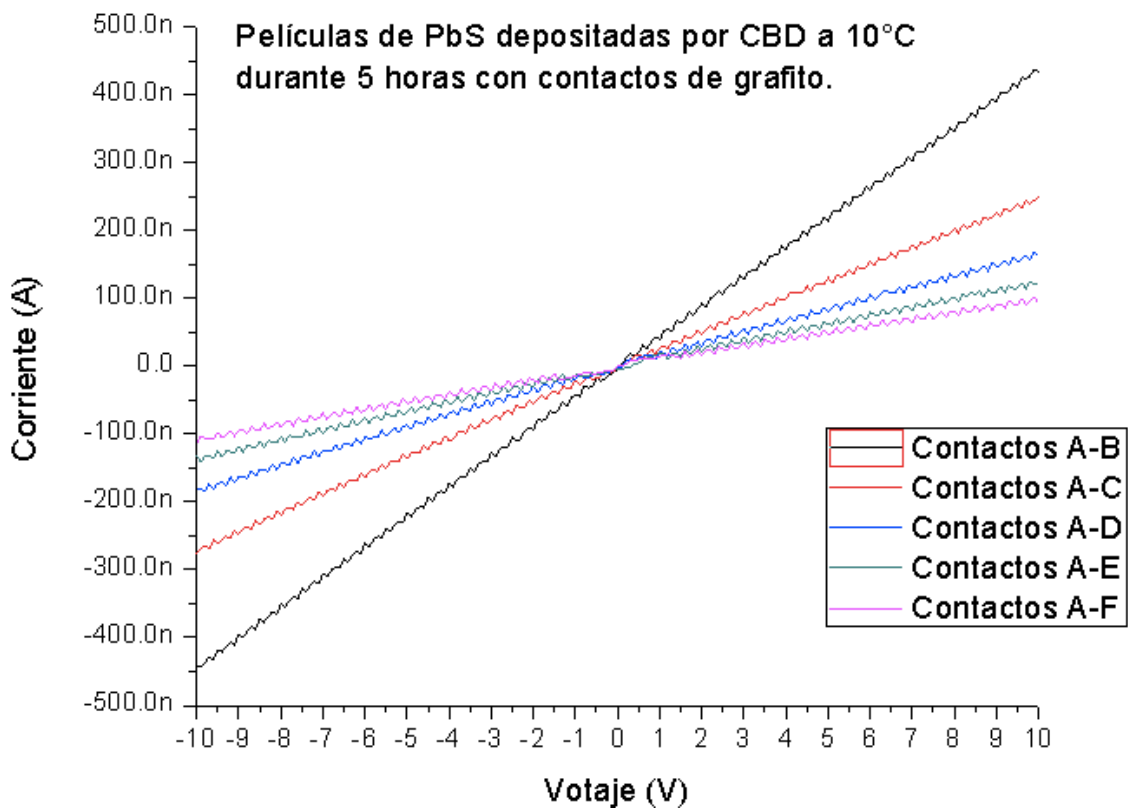


Figura 5.12 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 10°C por 5 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

En las figuras 5.13, 5.14 y 5.15 se muestran las gráficas de $I-V$ de las películas de PbS con contactos de grafito depositadas a 15 °C con tiempos de depósito de 2, 3.5 y 5 horas respectivamente, en las que se puede apreciar el mismo comportamiento que en las anteriormente mostradas, donde al ir aumentando el tiempo del depósito del sulfuro de plomo, la película se hizo más conductora y en todos los casos podemos observar un cambio entre la medición en los contactos más cercanos y los demás, ya que como es de esperarse al alejar los contactos comenzamos a aumentar la resistencia.

Es conveniente mencionar también que en estas tres películas depositadas a 15°C ya es posible identificar la linealidad de la curva $I-V$ en su comportamiento óhmico.

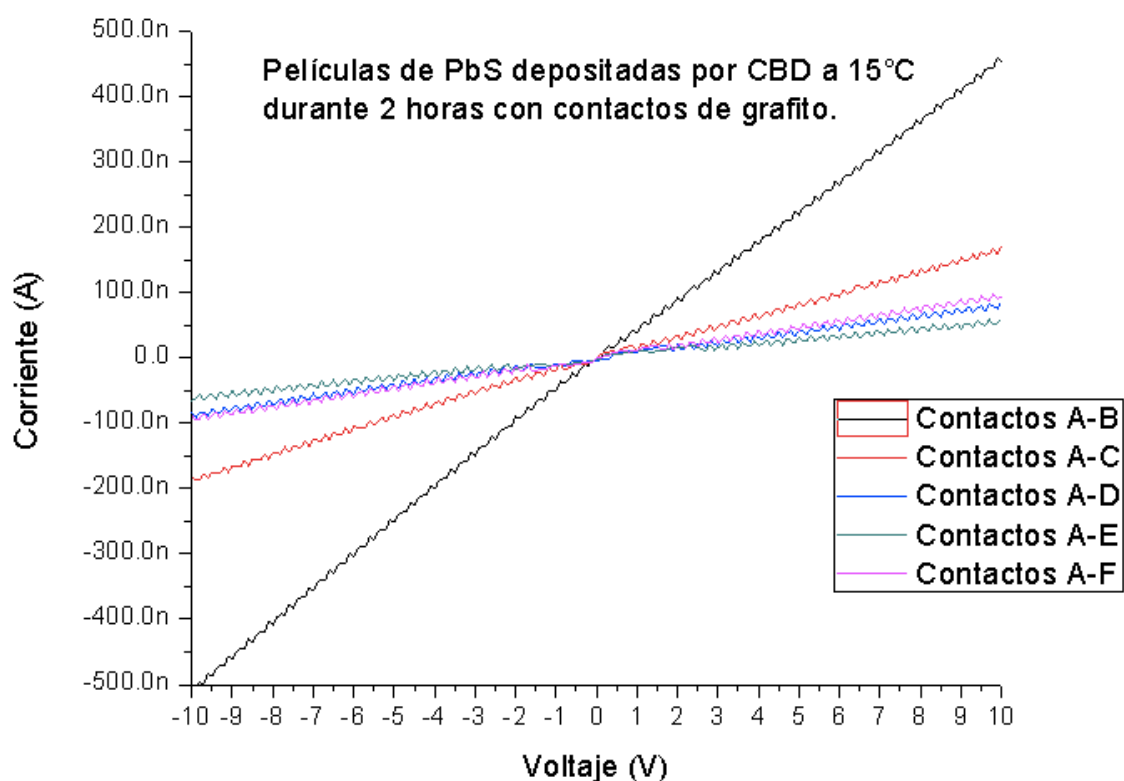


Figura 5.13 Curvas $I-V$ de película delgada de PbS depositada por CBD a 15°C por 2 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

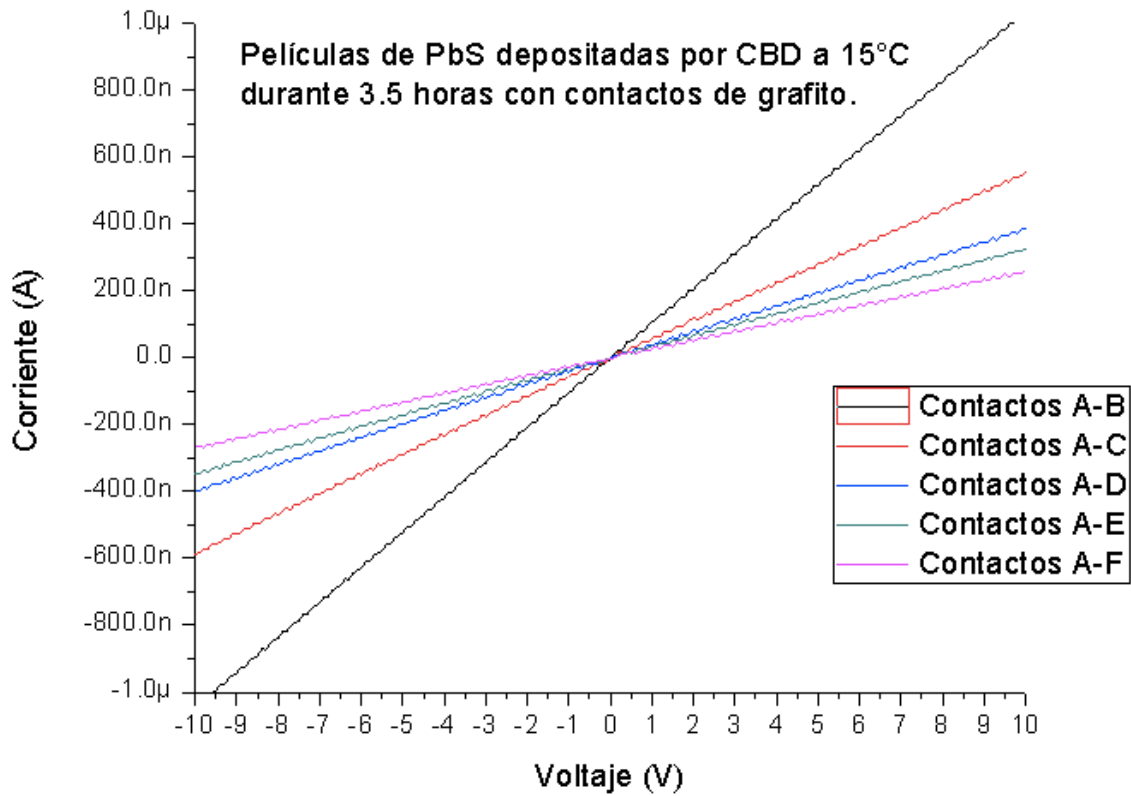


Figura 5.14 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 15°C por 3.5 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

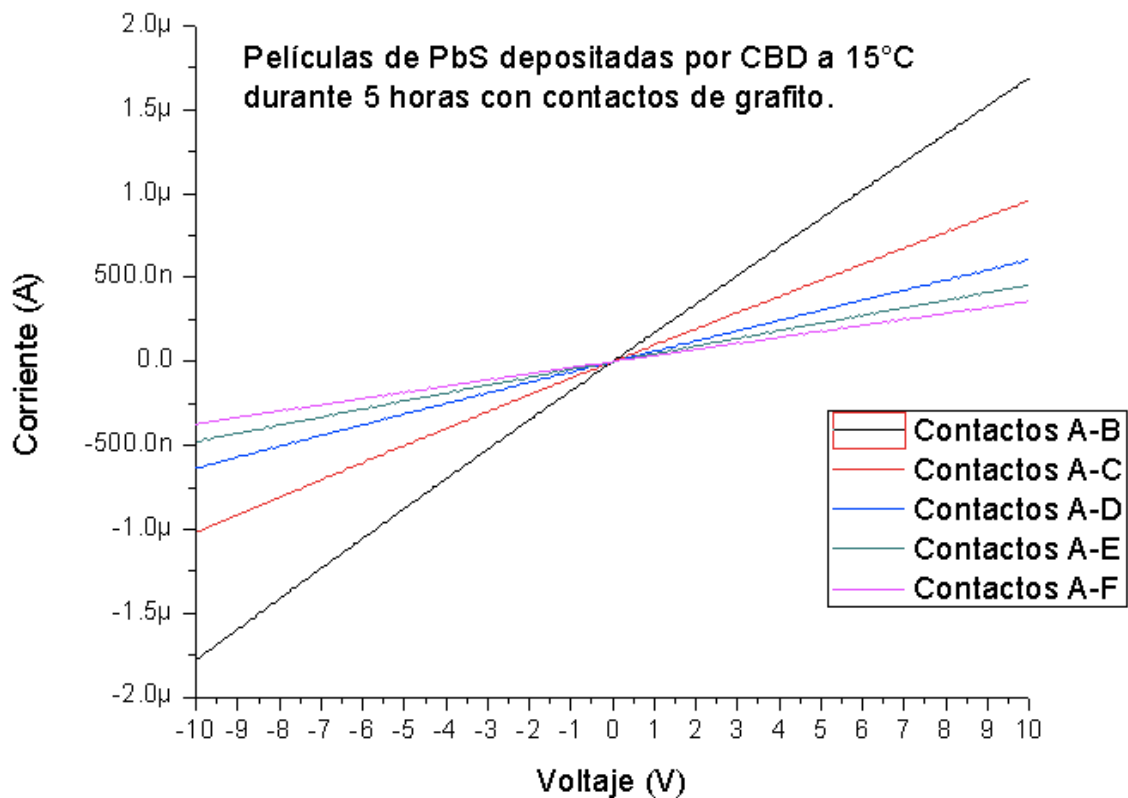


Figura 5.15 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 15°C por 5 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

En las figuras 5.16, 5.17 y 5.18 se muestran las gráficas de $I-V$ de las películas de PbS con contactos de grafito depositadas a 20 °C con tiempos de depósito de 2, 3.5 y 5 horas respectivamente.

Es importante detenerse a interpretar estos gráficos, ya que en ellas podemos ver claramente la importancia no solo de la temperatura de depósito sino también de la gran influencia que tiene la temperatura del depósito en la conductividad del material, ya que al ver en la figura 5.16 donde el sulfuro de plomo fue depositado en tan solo 2 horas, el valor de corriente máximo alcanzado al llegar a los 10 volts en el barrido es de alrededor de 950 nA, mientras que en los gráficos posteriores con depósitos de 3.5 y 5 horas podemos observar que en uno la mayoría alcanza el orden de los micro amperes y en otra todos superan esa escala.

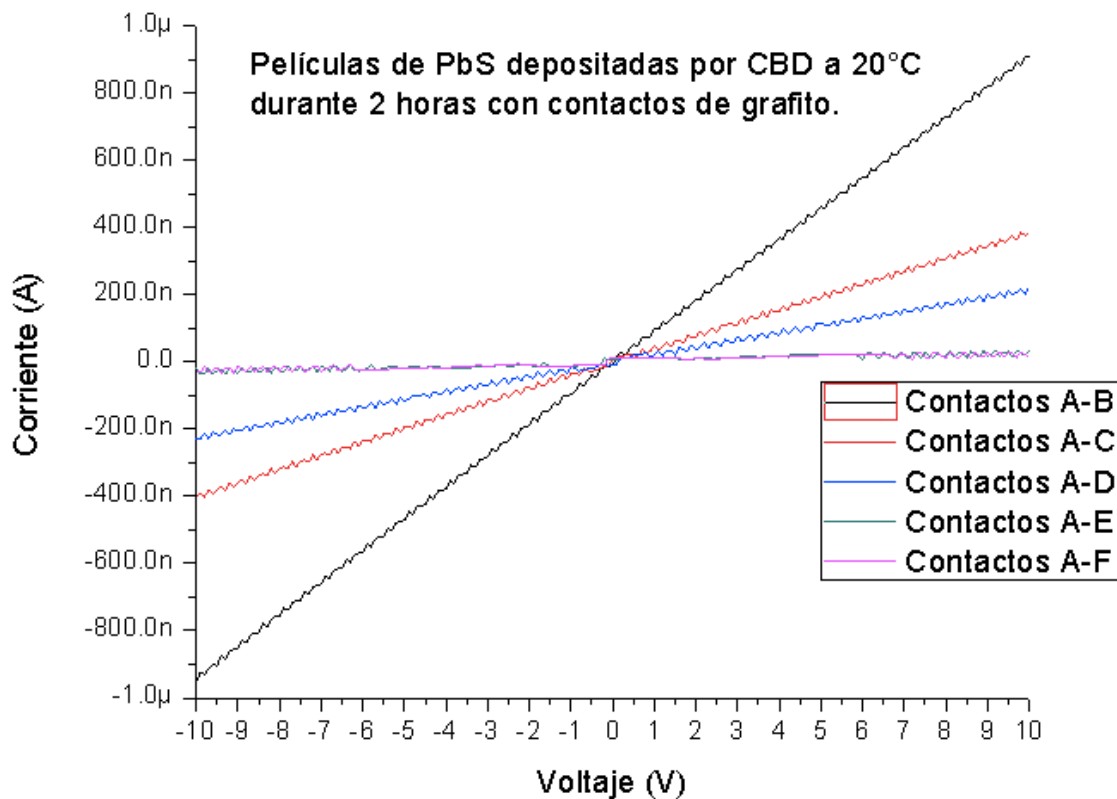


Figura 5.16 Curvas $I-V$ de película delgada de PbS depositada por CBD a 20°C por 2 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

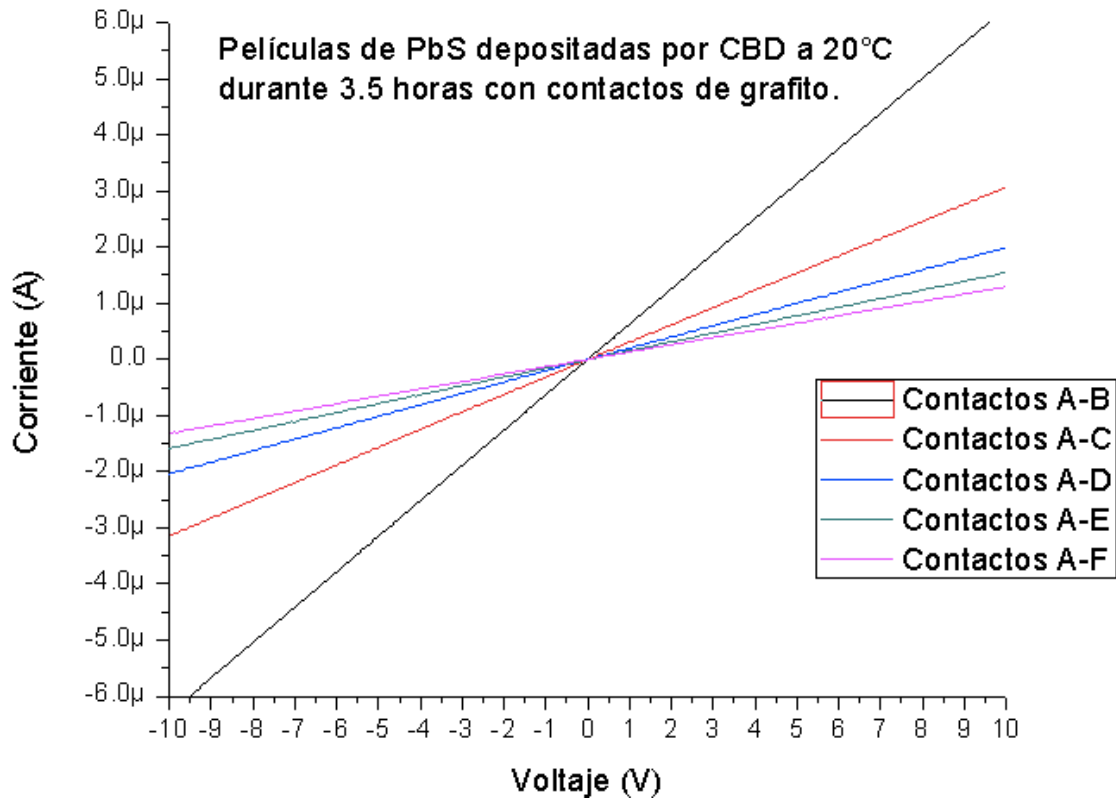


Figura 5.17 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 20°C por 3.5 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

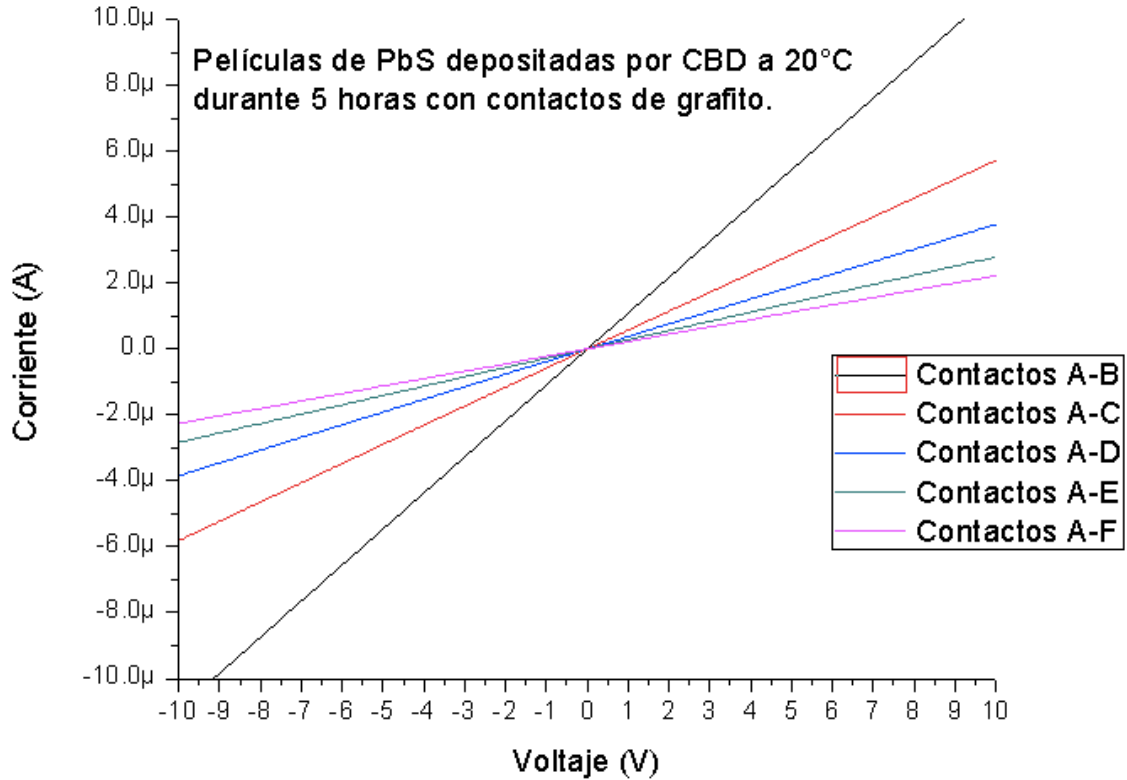


Figura 5.18 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 20°C por 5 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

En las figuras 5.19, 5.20 y 5.21 se muestran las gráficas de $I-V$ de las películas de PbS con contactos de grafito depositadas a 30 °C con tiempos de depósito de 1.5, 3 y 4 horas respectivamente.

En estas películas logramos ver que solo con el aumento a 30°C en la temperatura de depósito del sulfuro de plomo, los resultados indican que en cada una de las 5 distancias de todas estas películas, a los 10 volts ya se tienen órdenes de micro amperes en todas las mediciones.

Debemos tomar en cuenta que el equipo utilizado tiene regulado a 20 μA como un máximo en la medición de corriente, por lo que en la figura 5.21 con la película depositada durante 4 horas no fue necesario graficar un barrido de -10 a 10 volts si no de -4 a 4 volts, ya que un poco al ser rebasados los 3 volts, todas las mediciones llegaron a ese parámetro.

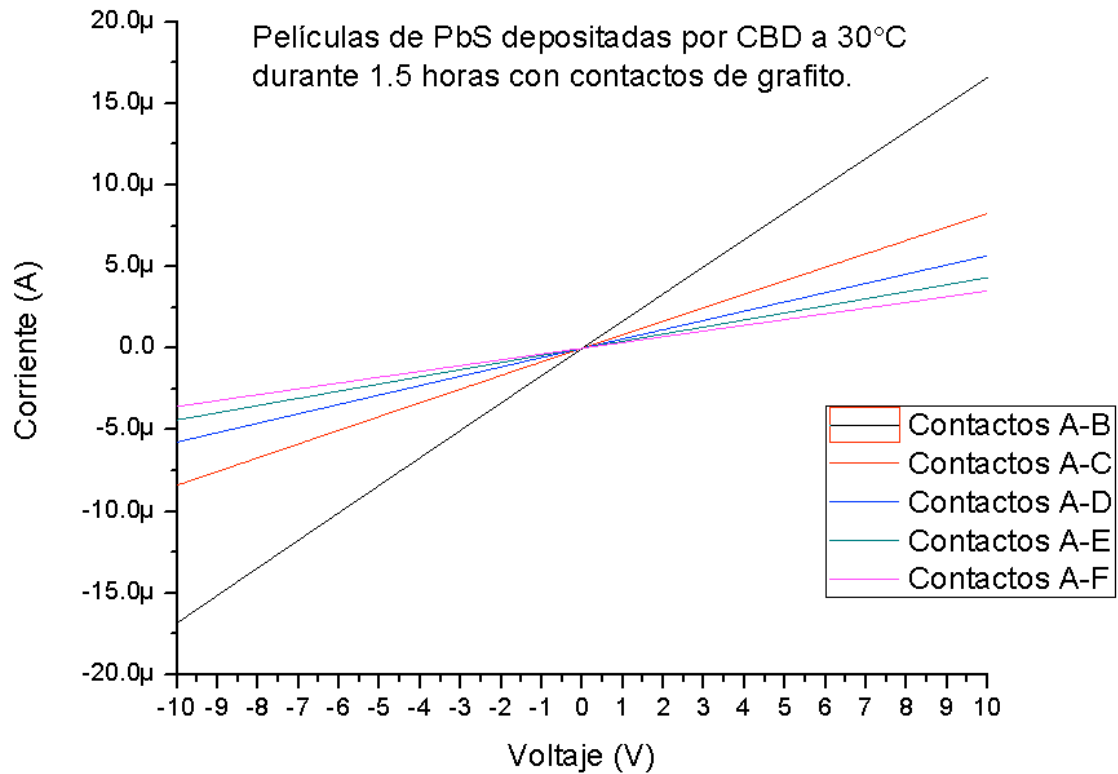


Figura 5.19 Curvas $I-V$ de película delgada de PbS depositada por CBD a 30°C por 1.5 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

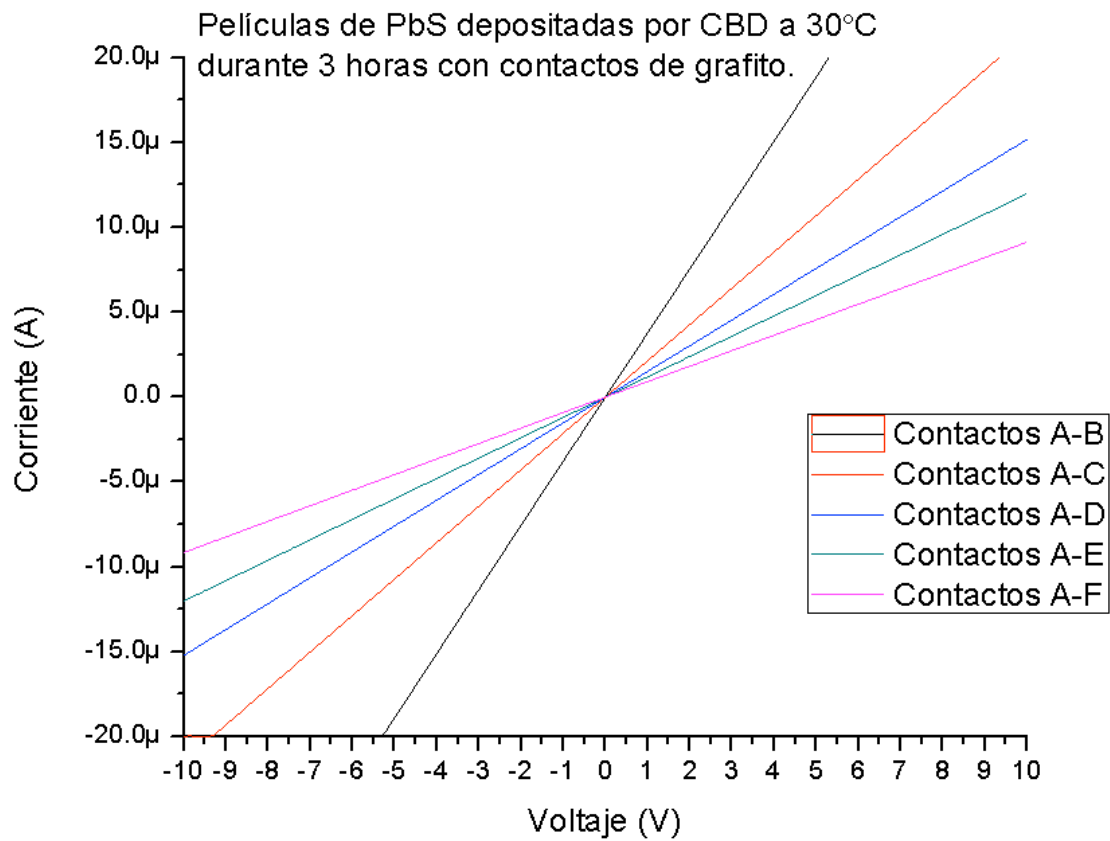


Figura 5.20 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 30°C por 3 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

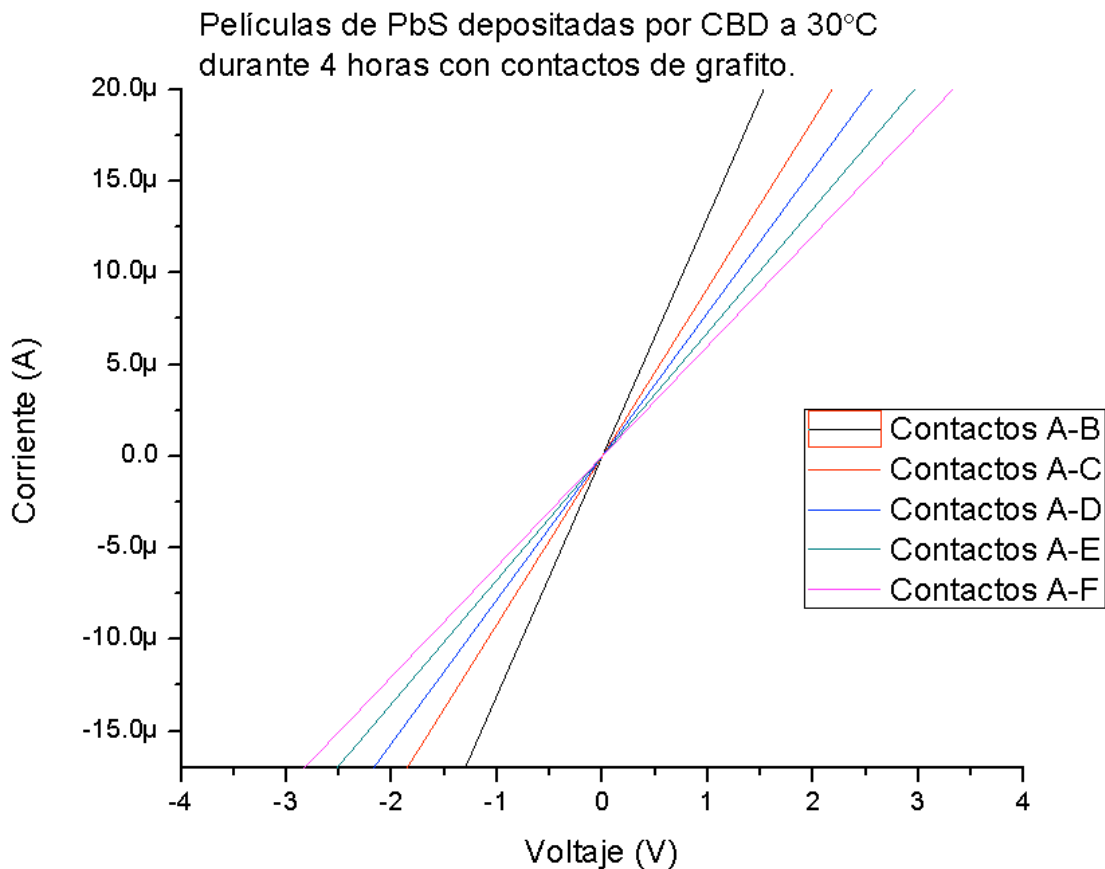


Figura 5.21 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 30°C por 4 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

En las figuras 5.22, 5.23 y 5.24 se muestran las gráficas de $I-V$ de las películas de PbS con contactos de grafito depositadas a 40 °C con tiempos de depósito de 1.5, 3 y 4 horas respectivamente.

Solo con ver los resultados de estas tres películas delgadas podemos notar que el comportamiento sigue siendo el mismo, ir teniendo una mejor respuesta convirtiéndose en una película más conductora.

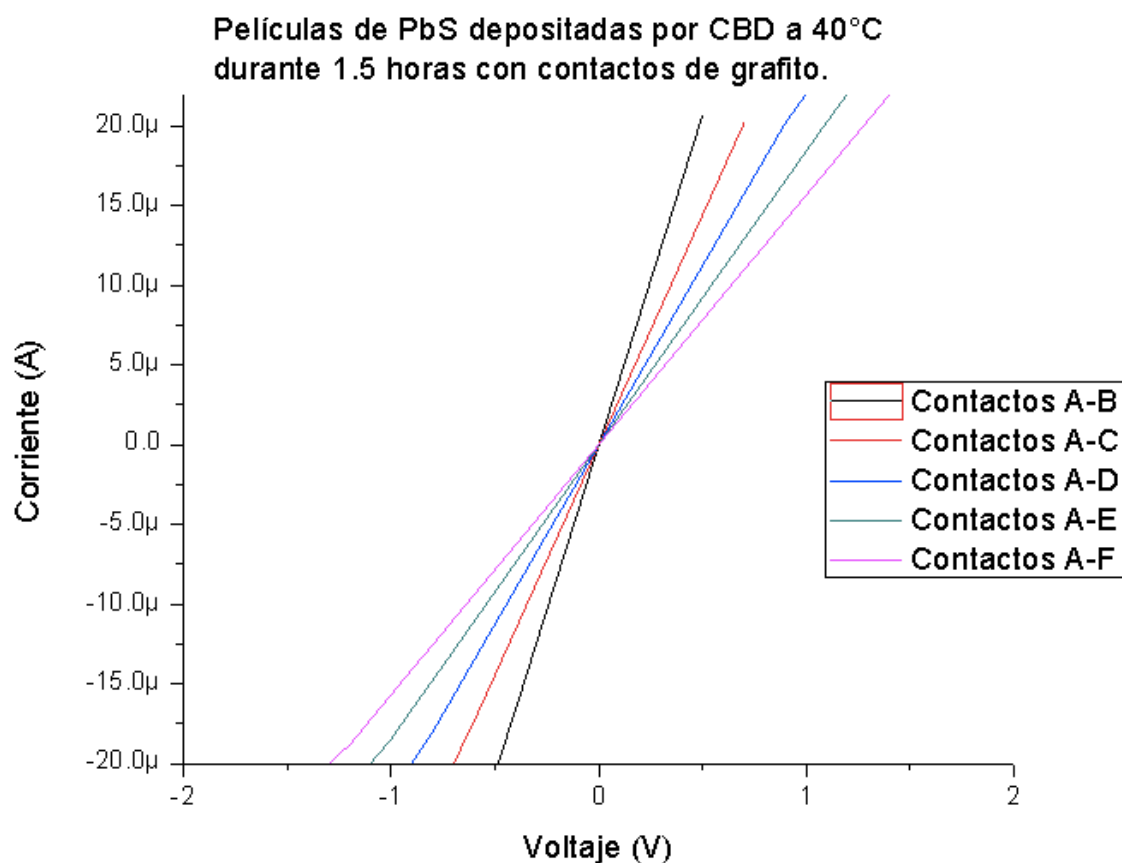


Figura 5.22 Curvas $I-V$ de película delgada de PbS depositada por CBD a 40°C por 1.5 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

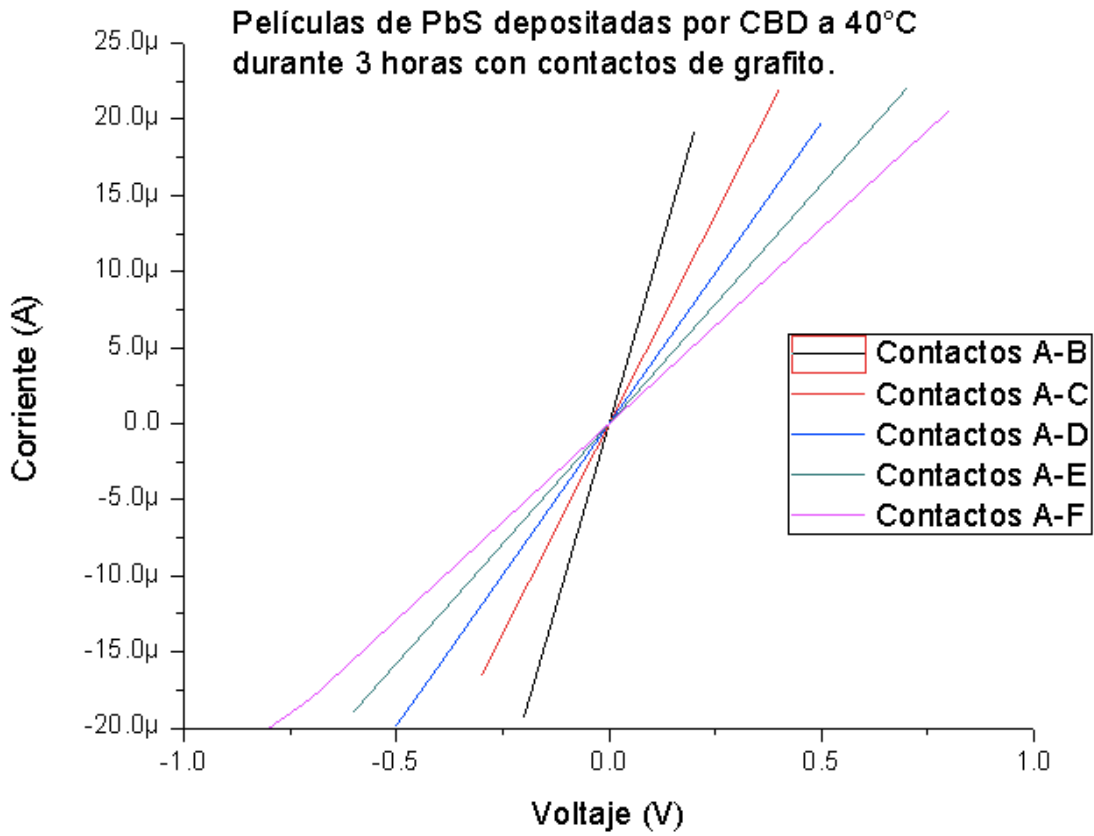


Figura 5.23 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 40°C por 3 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

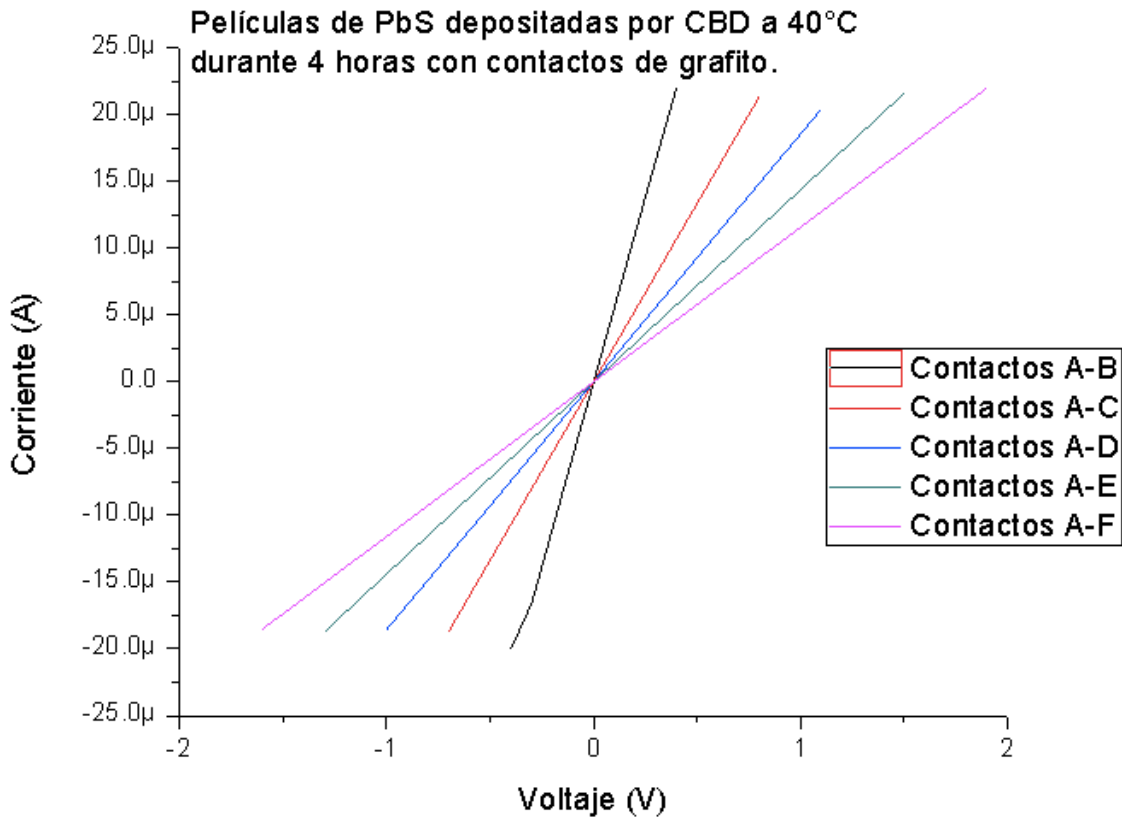


Figura 5.24 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 40°C por 4 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

En las figuras 5.25, 5.26 y 5.27 se muestran las gráficas de $I-V$ de las películas de PbS con contactos de grafito depositadas a 50 °C con tiempos de depósito de 1, 2 y 3 horas respectivamente.

Una vez más el comportamiento esperado puede verse en las películas delgadas depositadas a 50°C, donde con menos voltaje cada vez se obtiene una mayor respuesta en corriente.

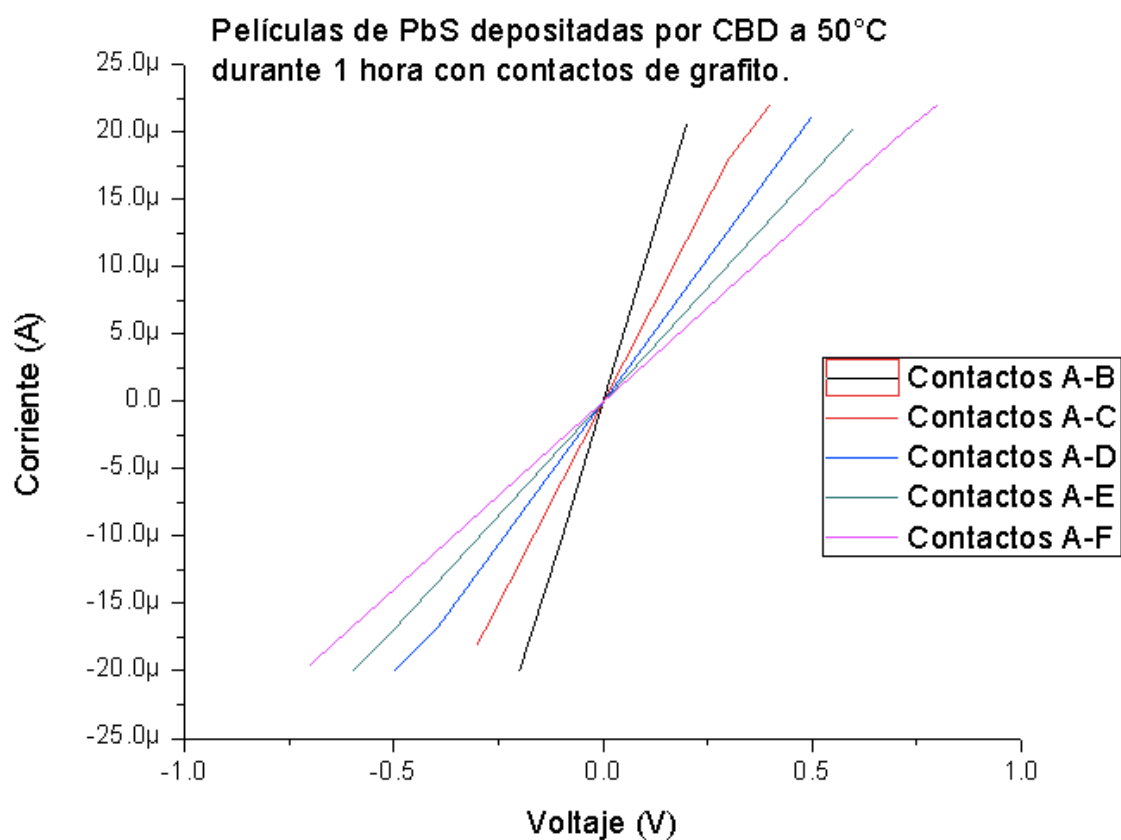


Figura 5.25 Curvas $I-V$ de película delgada de PbS depositada por CBD a 50°C por 1 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

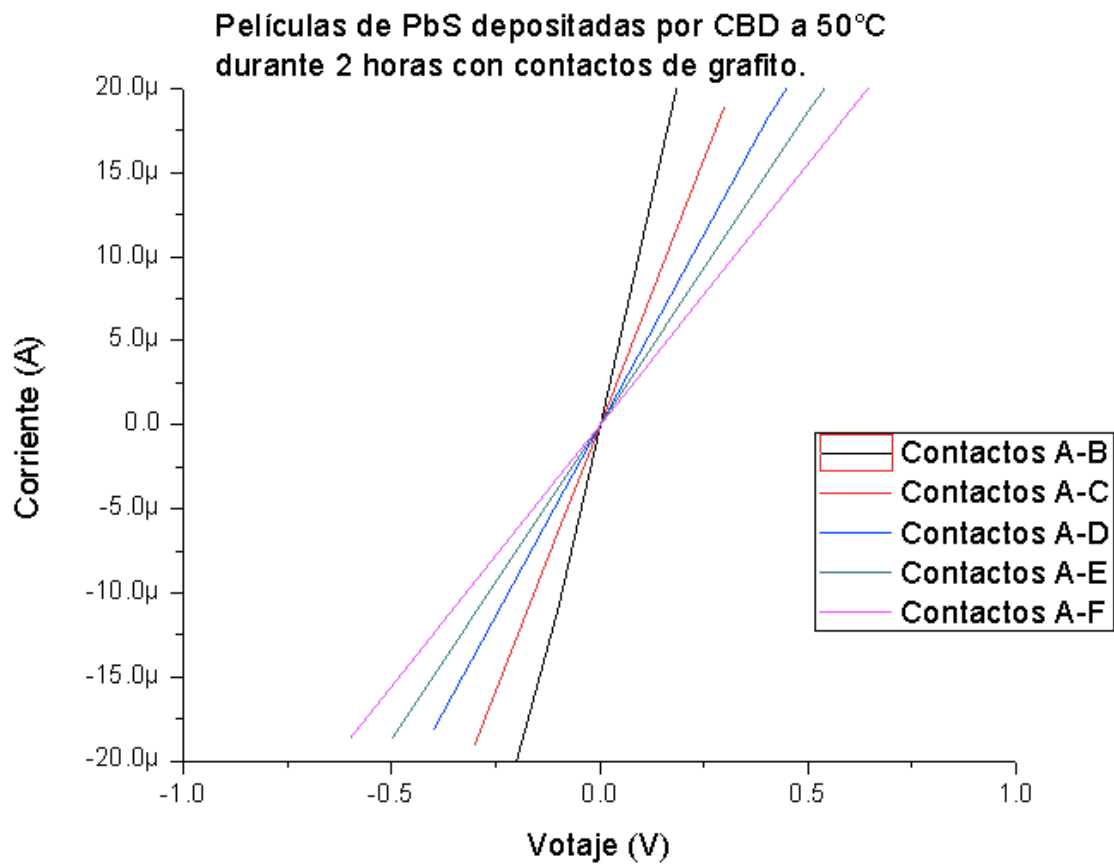


Figura 5.26 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 50°C por 2 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

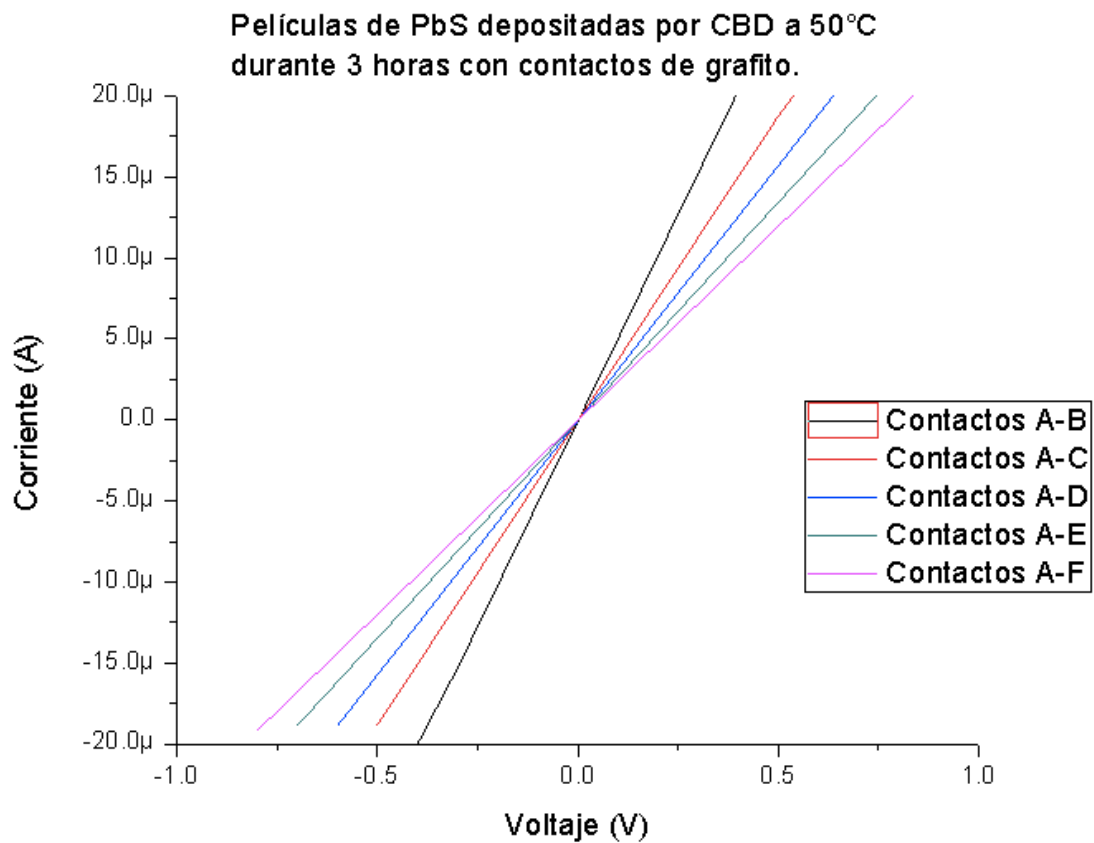


Figura 5.27 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 50°C por 3 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

En las figuras 5.28, 5.29 y 5.30 se muestran las gráficas de $I-V$ de las películas de PbS con contactos de grafito depositadas a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ con tiempos de depósito de 1, 2 y 3 horas respectivamente.

Al igual que en los casos anteriores, la respuesta es muy similar, poco a poco comienza a ser menos notorio ya que es muy pequeño el voltaje implementado para que el equipo de medición llegue a su límite.

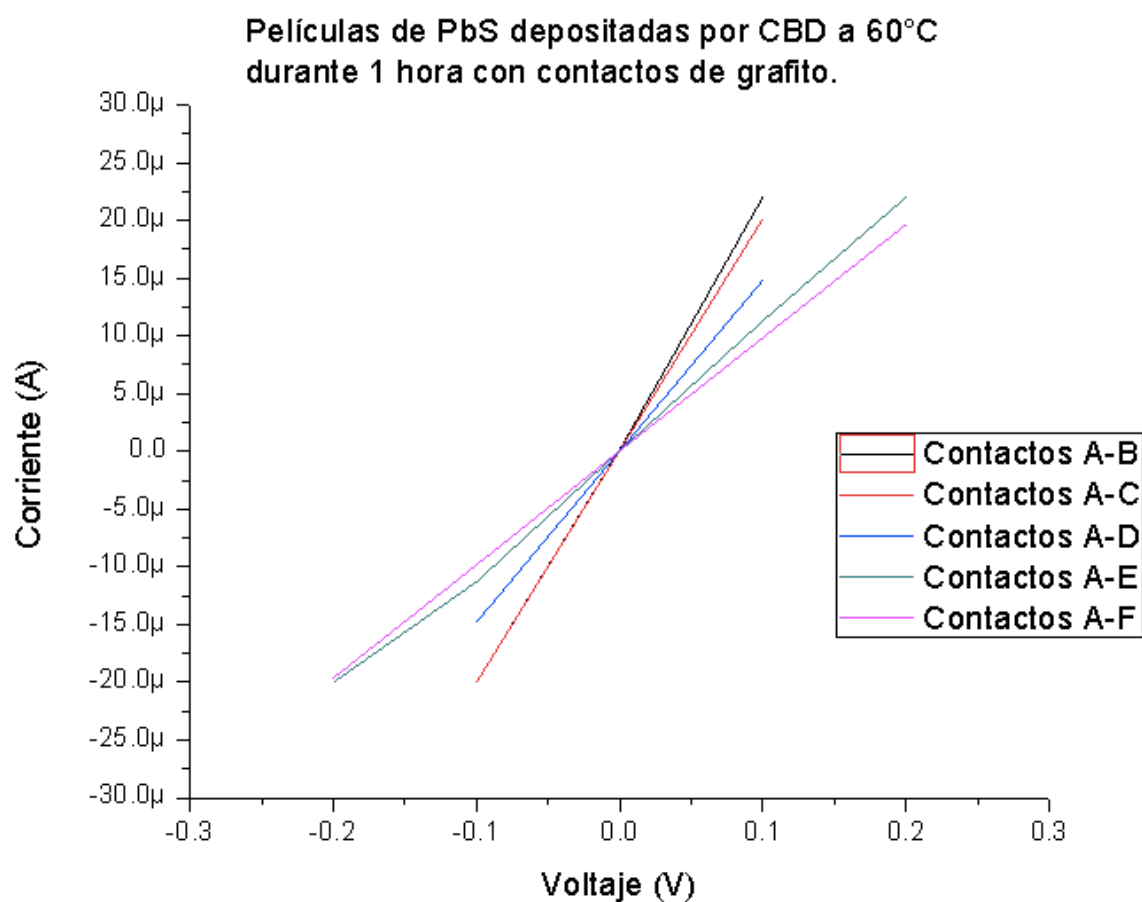


Figura 5.28 Curvas $I-V$ de película delgada de PbS depositada por CBD a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 1 hora con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

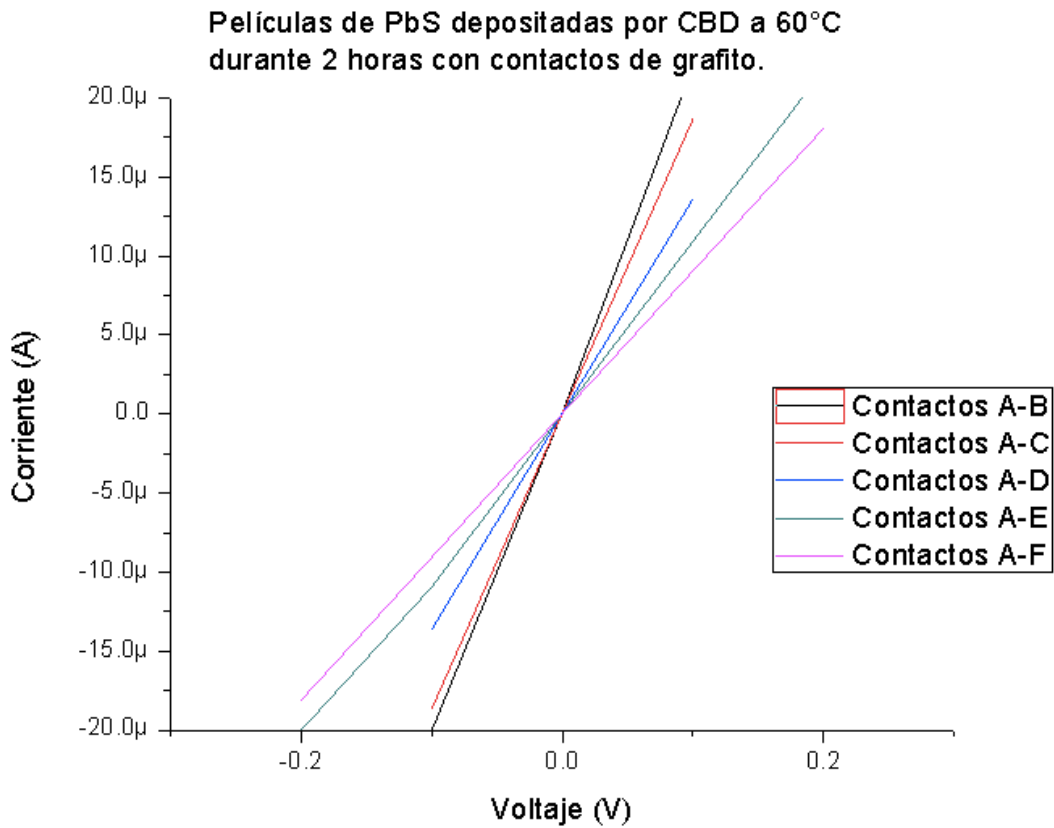


Figura 5.29 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 60°C por 2 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

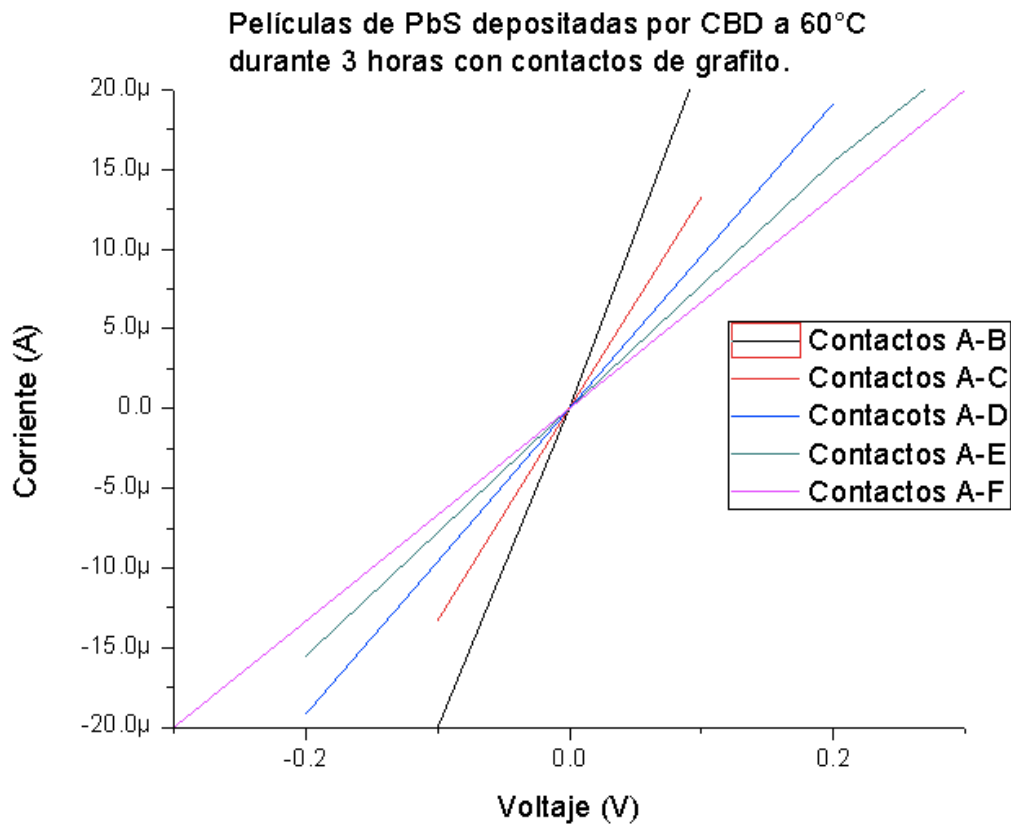


Figura 5.30 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 60°C por 3 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

En las figuras 5.31, 5.32 y 5.33 se muestran las gráficas de $I-V$ de las películas de PbS con contactos de grafito depositadas a 70 °C con tiempos de depósito de 1, 2 y 3 horas respectivamente, en las cuales ya es difícil notar un cambio con respecto a las tres mostradas anteriormente, esto debido a que el equipo de medición no nos deja incrementar el voltaje.

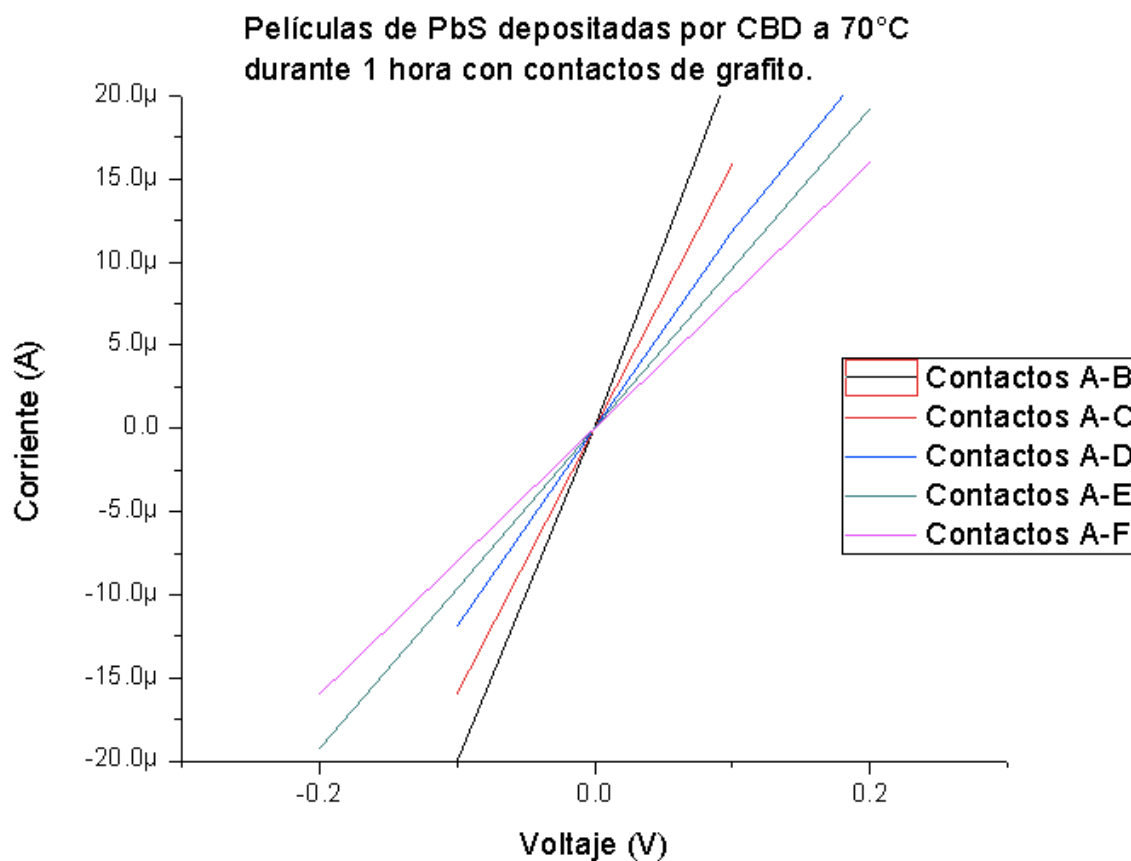


Figura 5.31 Curvas $I-V$ de película delgada de PbS depositada por CBD a 70°C por 1 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

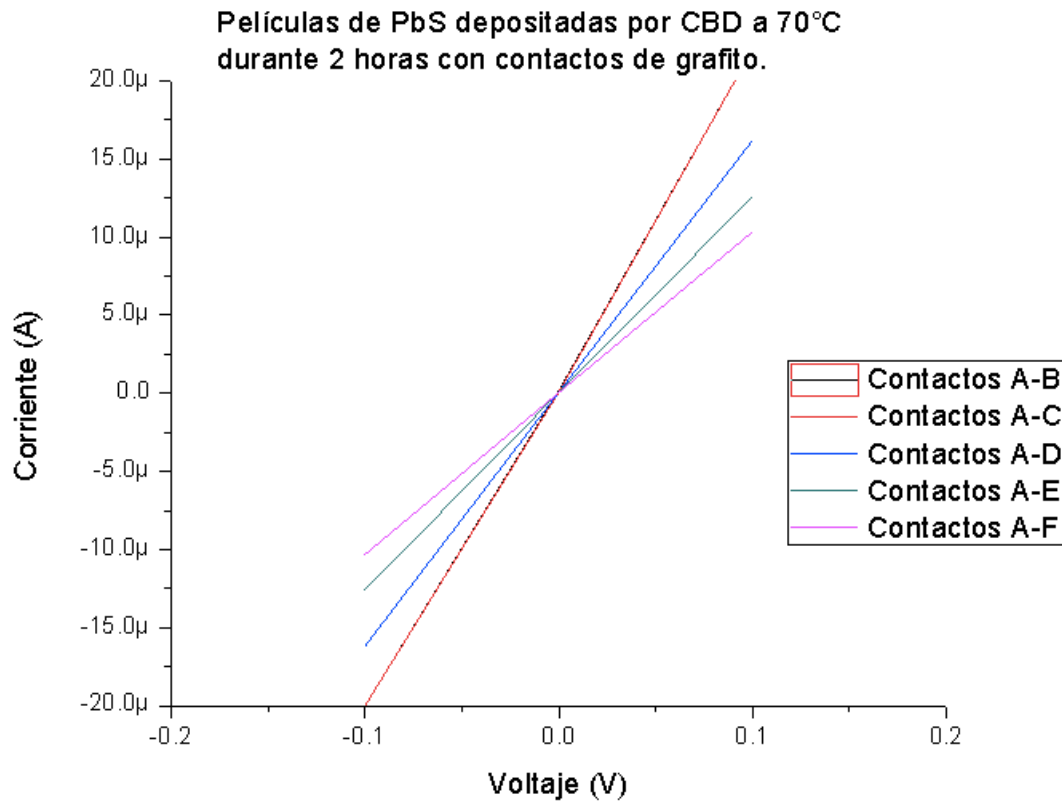


Figura 5.32 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 70°C por 2 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

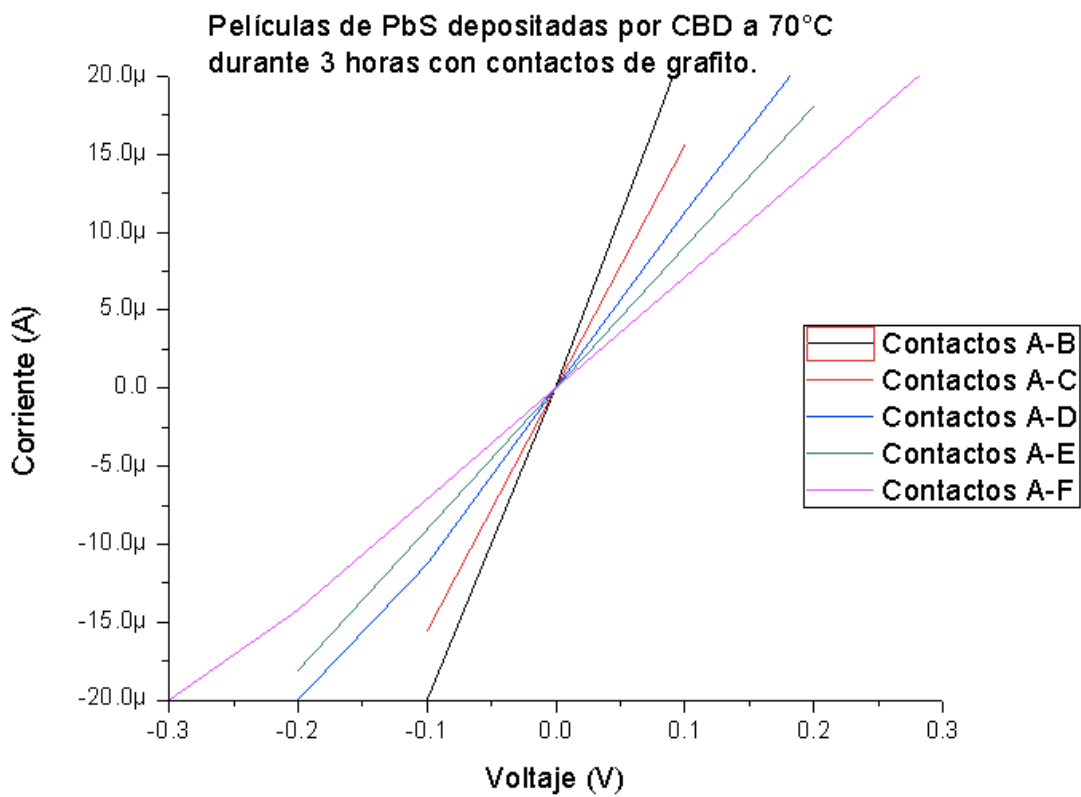


Figura 5.33 Curvas *I-V* de película delgada de PbS depositada por CBD a 70°C por 3 horas con contactos de grafito depositado de forma manual con tinta.

5.3 Resistencia de contacto y resistividad

Mediante el procedimiento previamente detallado en el apartado 4.5 del capítulo cuarto se obtuvieron estos dos parámetros de gran importancia en el estudio eléctrico del sulfuro de plomo depositado a diferentes temperaturas.

Con la facilidad que brinda el uso del software OriginLab se realizaron las gráficas R-L donde en el eje "Y" tenemos a la resistencia y en el eje "X" la distancia en centímetros que hay entre cada uno de los contactos.

En la figura 5.34 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias, siendo éstas el inverso de la pendiente de las curvas $I-V$ de acuerdo con la ley de ohm y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto R_c , la cual para este caso la tomamos como $R_c=0 \Omega$ ya que por la inhomogenidad presentada en esta película, sobre todo en su espesor, al hacer el ajuste lineal la resistencia de contacto nos dio valores negativos e irreales. La pendiente obtenida fue $m=1.6745 \times 10^9$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 10°C durante 3 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=1.66 \times 10^{-6} \text{cm}$, tengamos que $\rho = 1.95247 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$

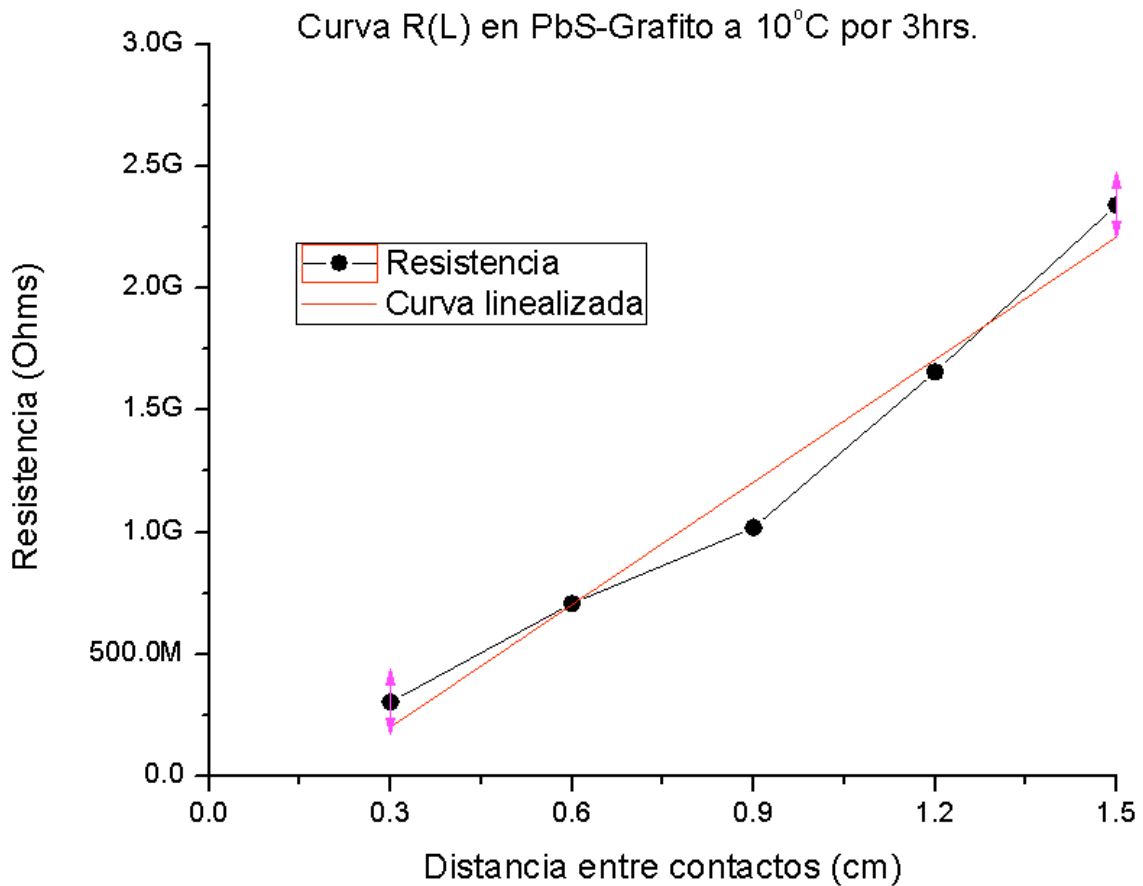


Figura 5.34 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 10 °C por 3 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.35 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto R_c , la cual para este caso también la tomamos como $R_c=0 \Omega$ ya que por la inhomogenidad presentada en esta película, sobre todo en su espesor, al hacer el ajuste lineal la resistencia de contacto nos dio valores negativos e irreales. La pendiente obtenida fue $m=2.338 \times 10^8$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 10°C durante 4 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para este caso $A=23.1 \times 10^{-6} \text{cm}$, tengamos que $\rho = 5.4015 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$

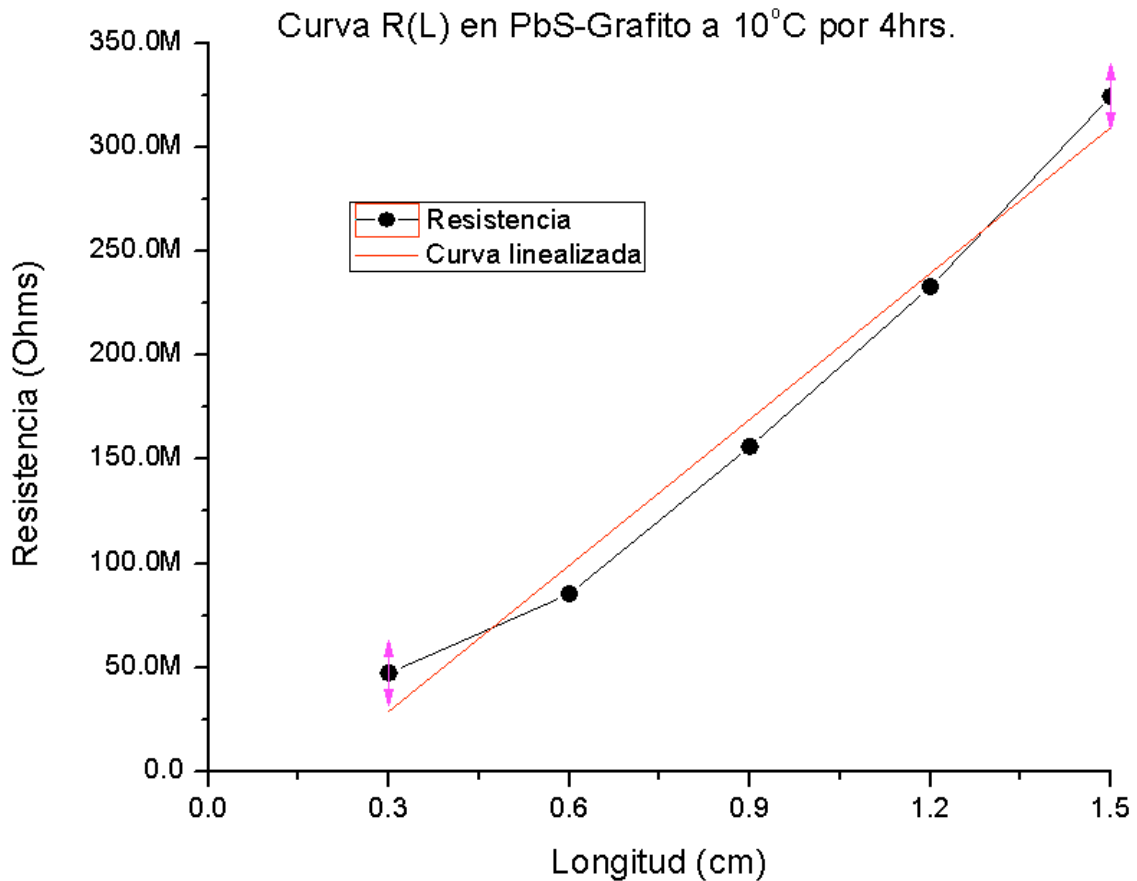


Figura 5.35 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 10 °C por 4 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.36 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=18.76 \text{ M}\Omega$ y pendiente $m=6.505 \times 10^7$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 10°C durante 5 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=30.8 \times 10^{-6} \text{ cm}$, tengamos que $\rho = 1.95247 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$

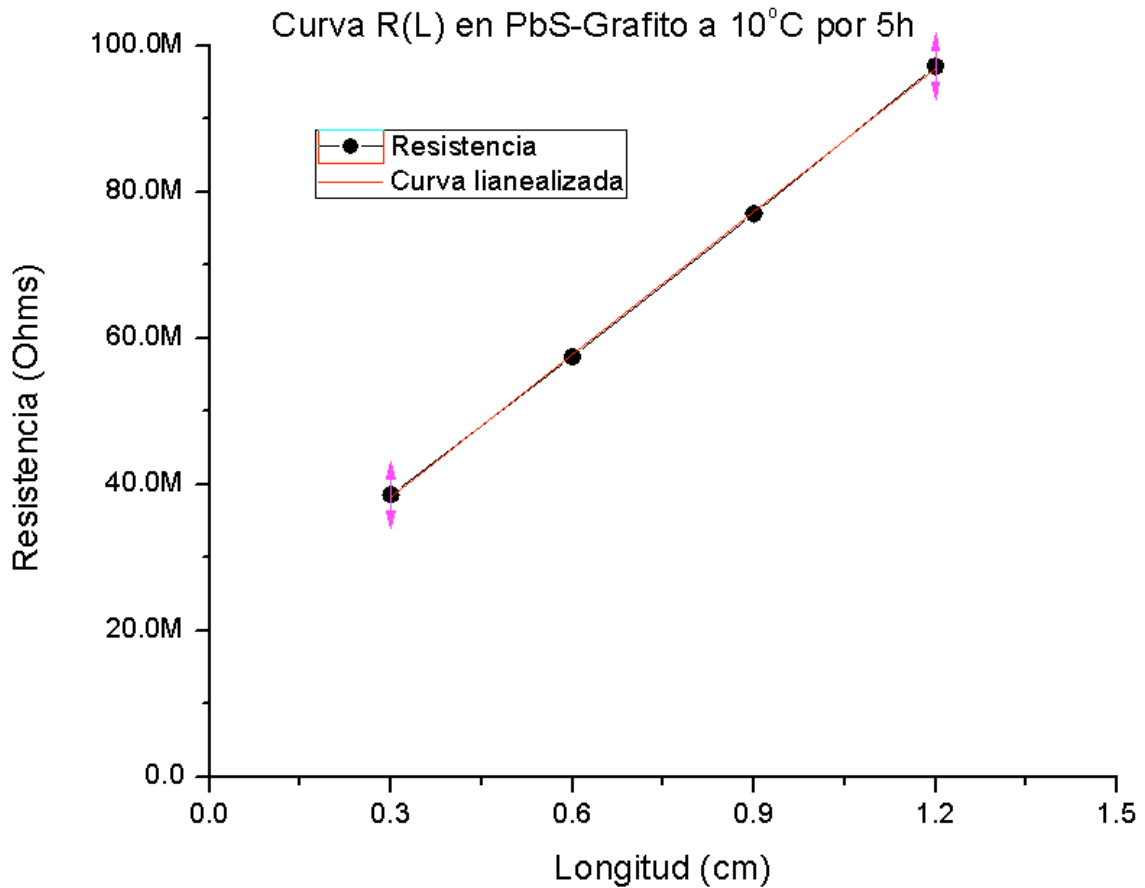


Figura 5.36 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 10 °C por 5 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.37 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=9.68 \text{ M}\Omega$ y pendiente $m=9.548 \times 10^7$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 15°C durante 2 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=14.8 \times 10^{-6} \text{ cm}$, tengamos que $\rho = 1.4132 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$

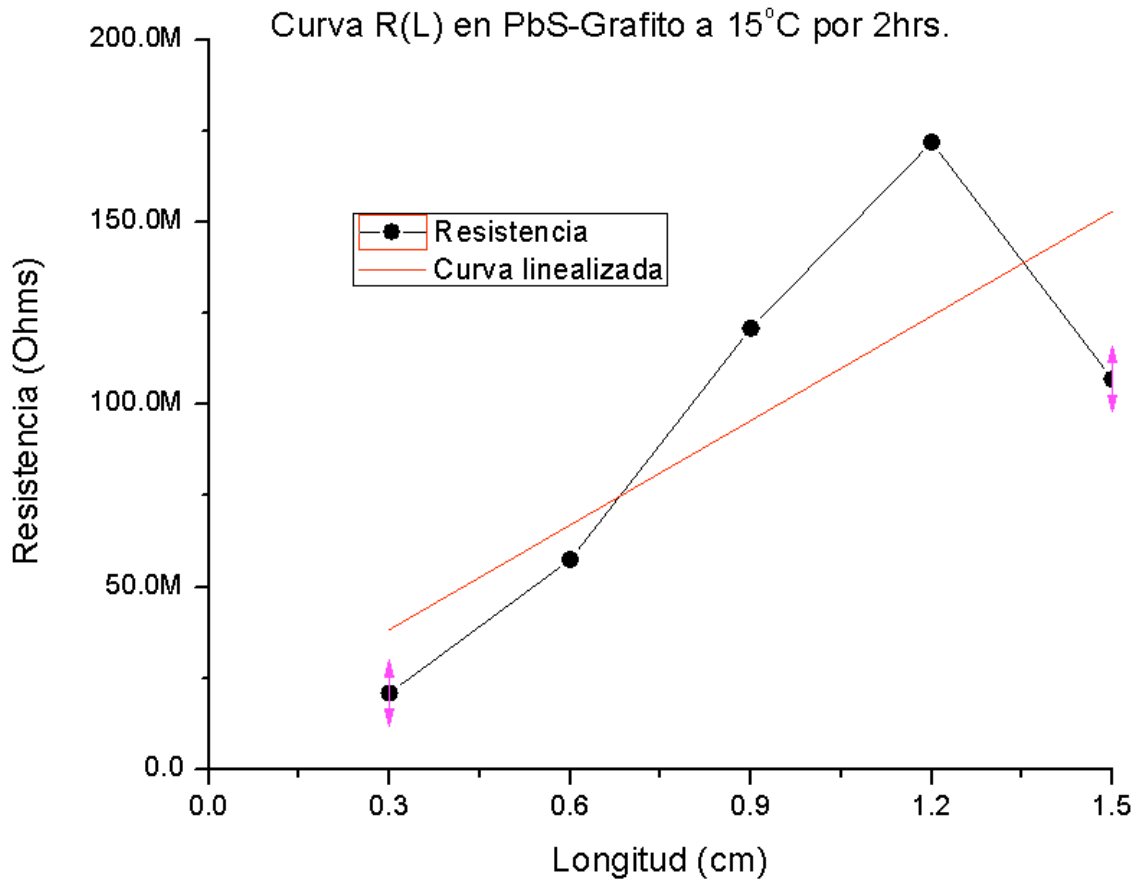


Figura 5.37 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 15 °C por 2 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.38 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c = 34.94 \text{ M}\Omega$ y pendiente $m = -1.20 \times 10^7$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 15°C durante 3.5 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A = 24.2 \times 10^{-6} \text{ cm}$, tengamos que $\rho = 2.911 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$

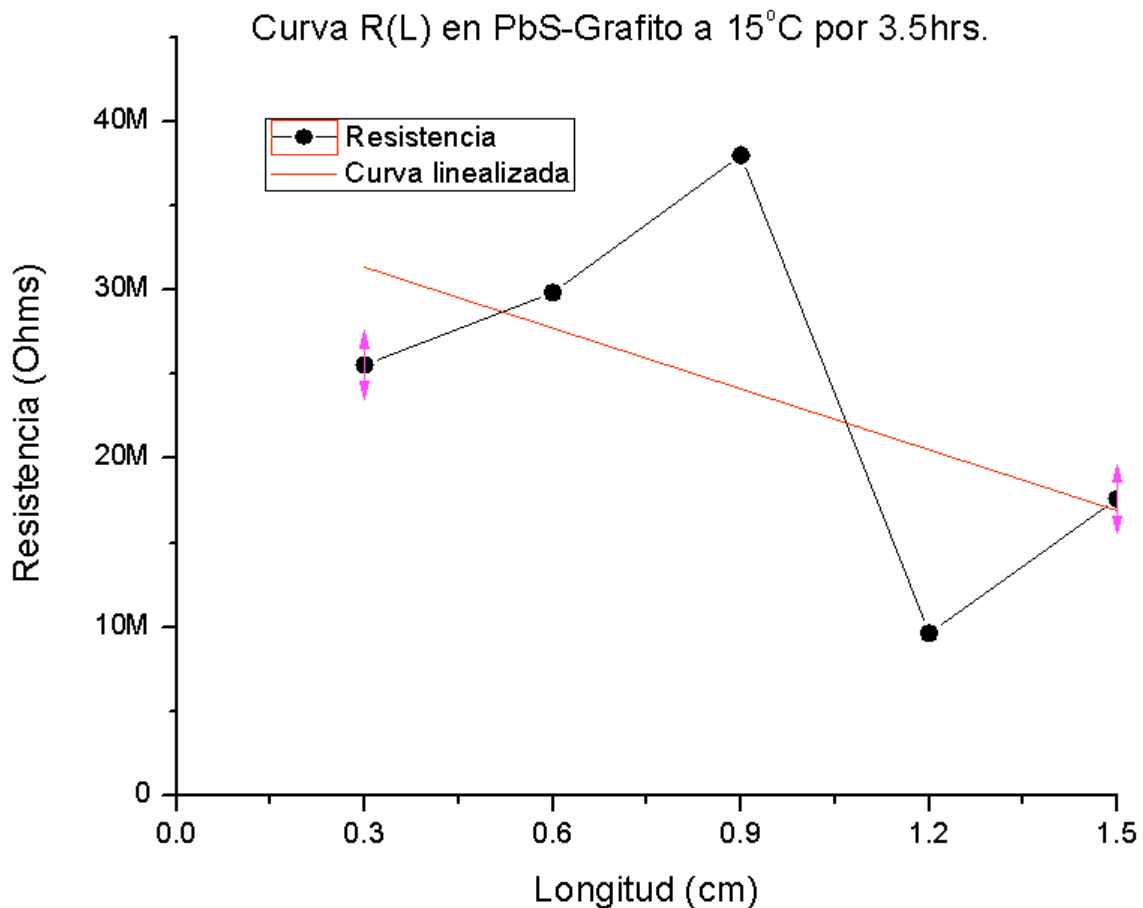


Figura 5.38 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 15 °C por 3.5 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.39 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto R_c , la cual para este caso también la tomamos como $R_c=0 \Omega$ ya que por la inhomogenidad presentada en esta película, sobre todo en su espesor, al hacer el ajuste lineal la resistencia de contacto nos dio valores negativos e irreales. La pendiente obtenida fue $m=1.8265 \times 10^7$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 15°C durante 5 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=26.62 \times 10^{-6} \text{cm}$, tengamos que $\rho = 4.862 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$

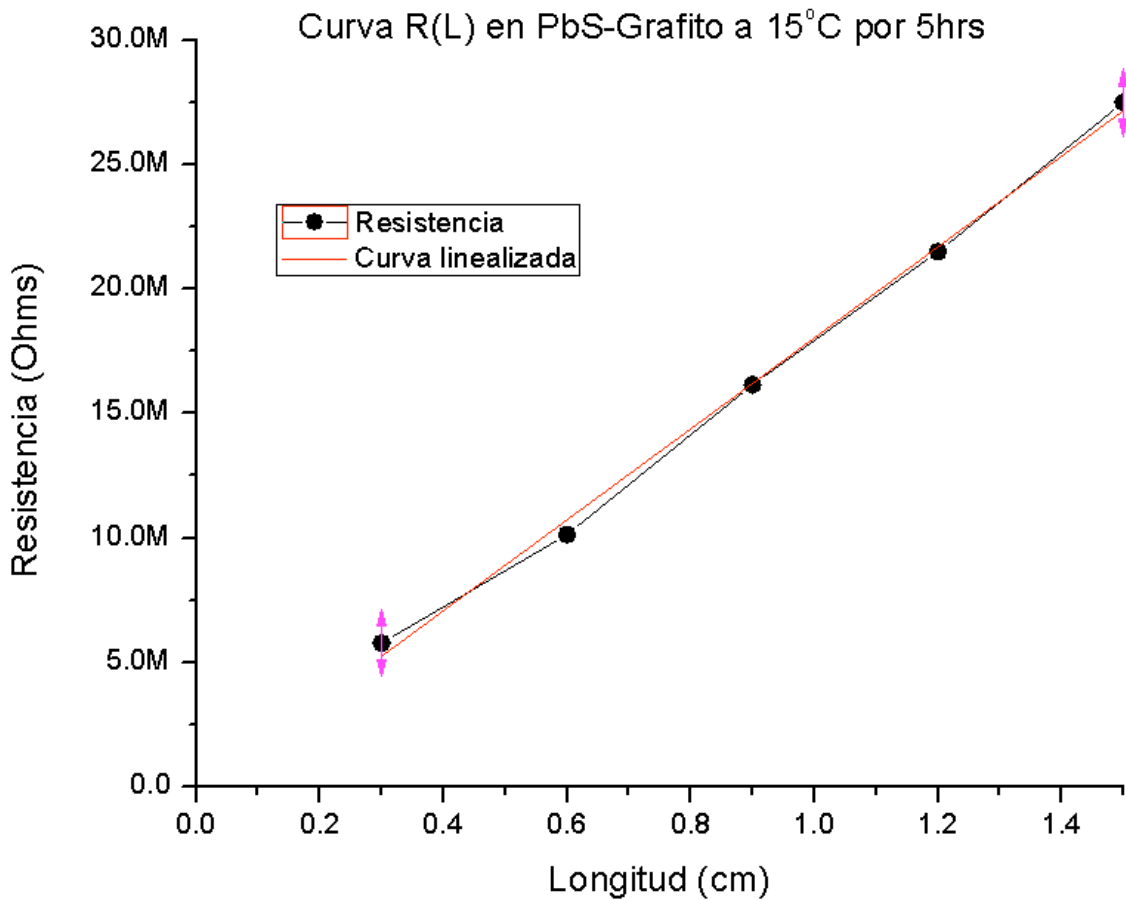


Figura 5.39 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 15 °C por 5 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.40 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto R_c , la cual para este caso también la tomamos como $R_c=0 \Omega$ ya que por la inhomogenidad presentada en esta película, sobre todo en su espesor, al hacer el ajuste lineal la resistencia de contacto nos dio valores negativos e irreales. La pendiente obtenida fue $m=3.23 \times 10^8$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 20°C durante 2 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=3.8 \times 10^{-5} \text{cm}$, tengamos que $\rho = 1.23 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$

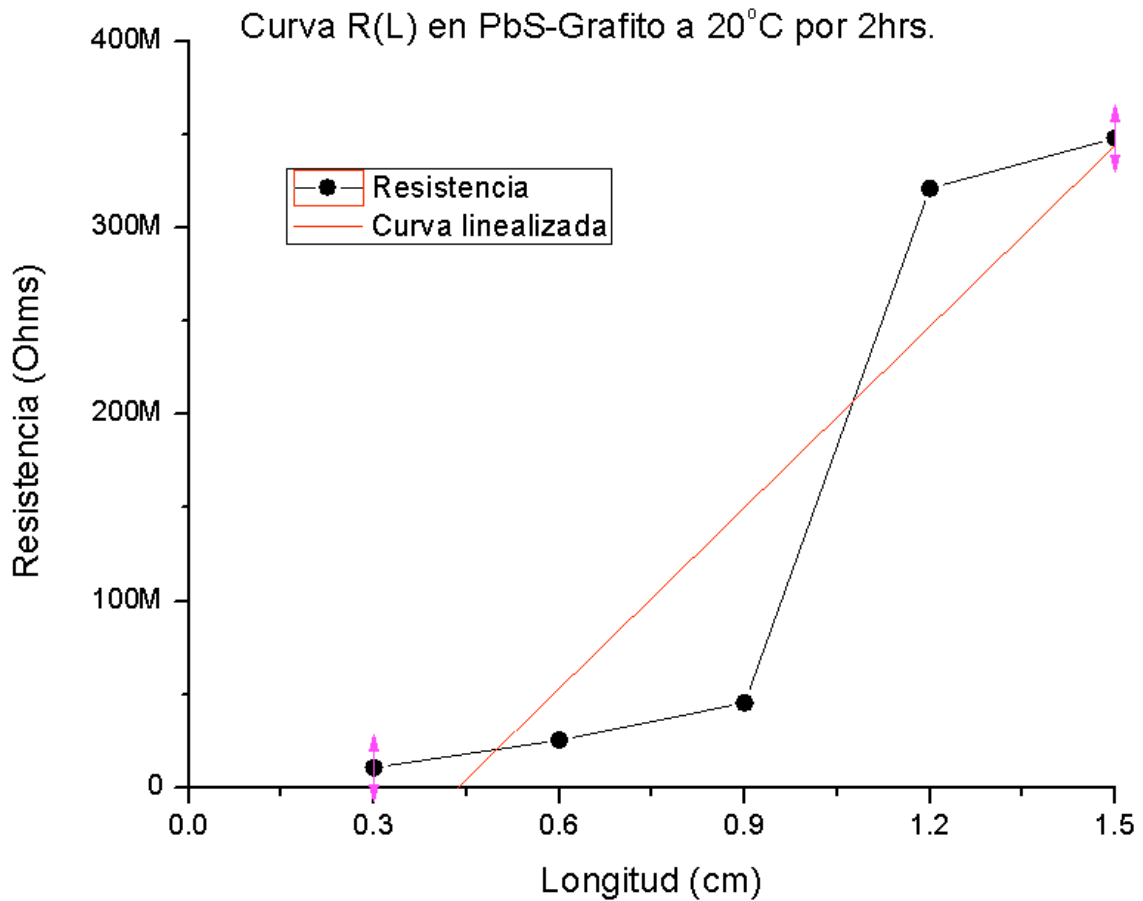


Figura 5.40 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 20 °C por 2 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.41 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=171,71$ k Ω y pendiente $m=5.1 \times 10^6$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 20°C durante 3.5 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=4.84 \times 10^{-5}$ cm, tenemos que $\rho = 2.471 \times 10^2 \Omega \cdot cm$

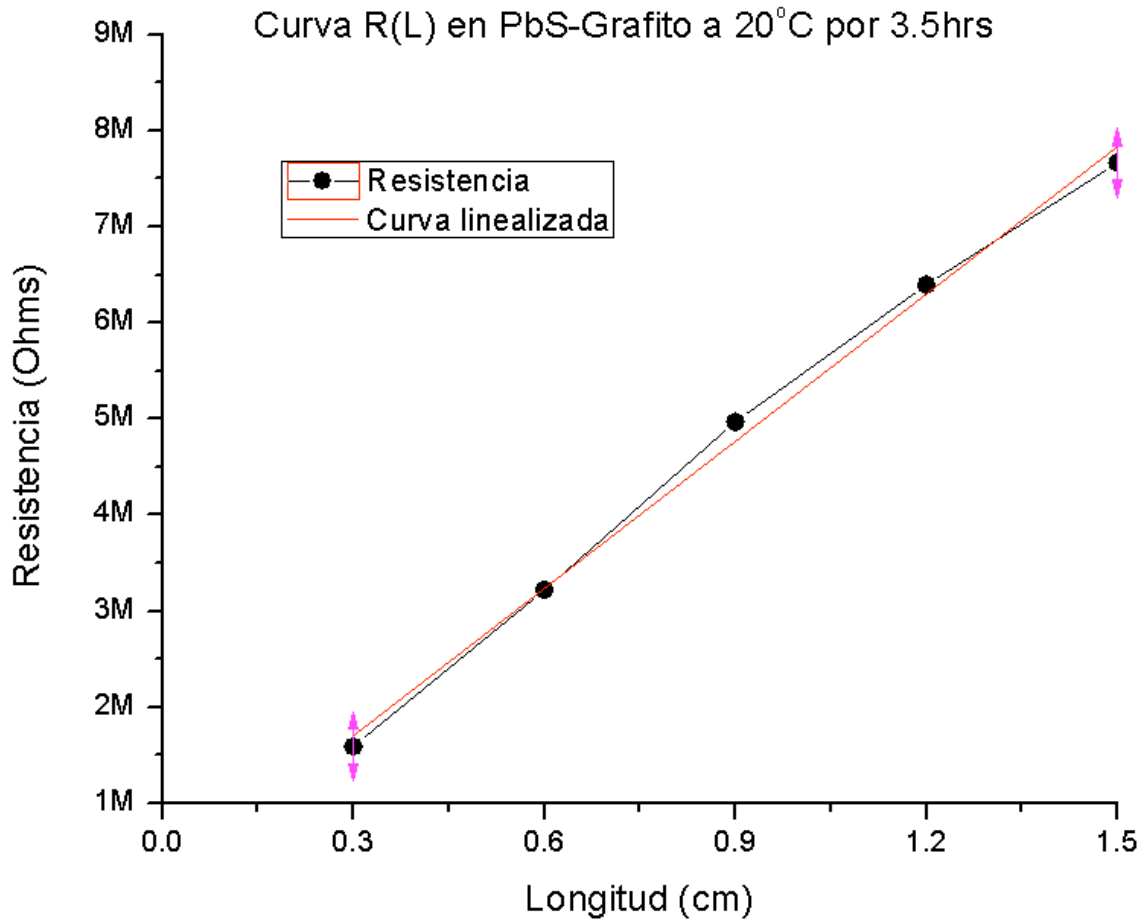


Figura 5.41 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 20 °C por 3.5 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.42 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=13.598 \text{ k}\Omega$ y pendiente $m=2.97 \times 10^6$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 20°C durante 5 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=78.1 \times 10^{-6} \text{ cm}$, tengamos que $\rho = 2.31 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$

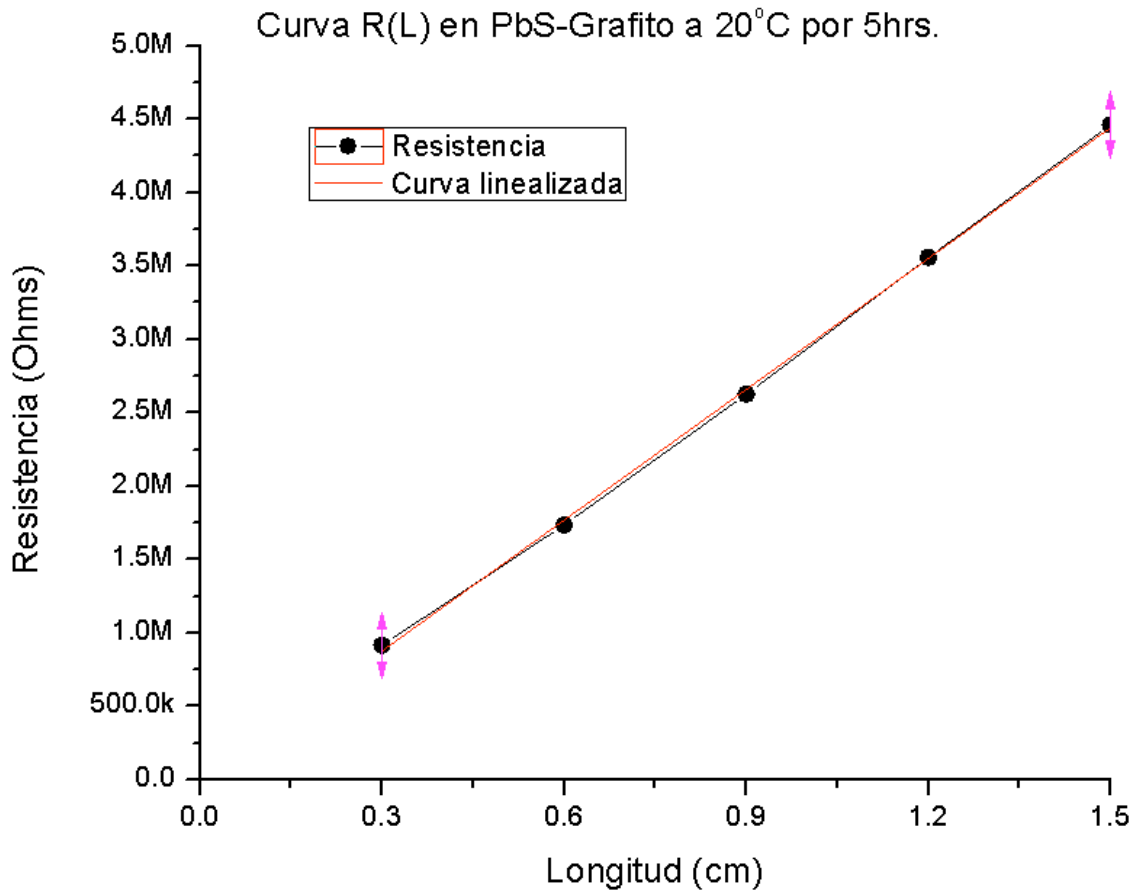


Figura 5.42 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 20 °C por 5 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.43 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=69.164 \text{ k}\Omega$ y pendiente $m=1.85 \times 10^6$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 30°C durante 1.5 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=41.14 \times 10^{-6} \text{ cm}$, tengamos que $\rho = 2.529 \times 10^1 \Omega \cdot \text{cm}$

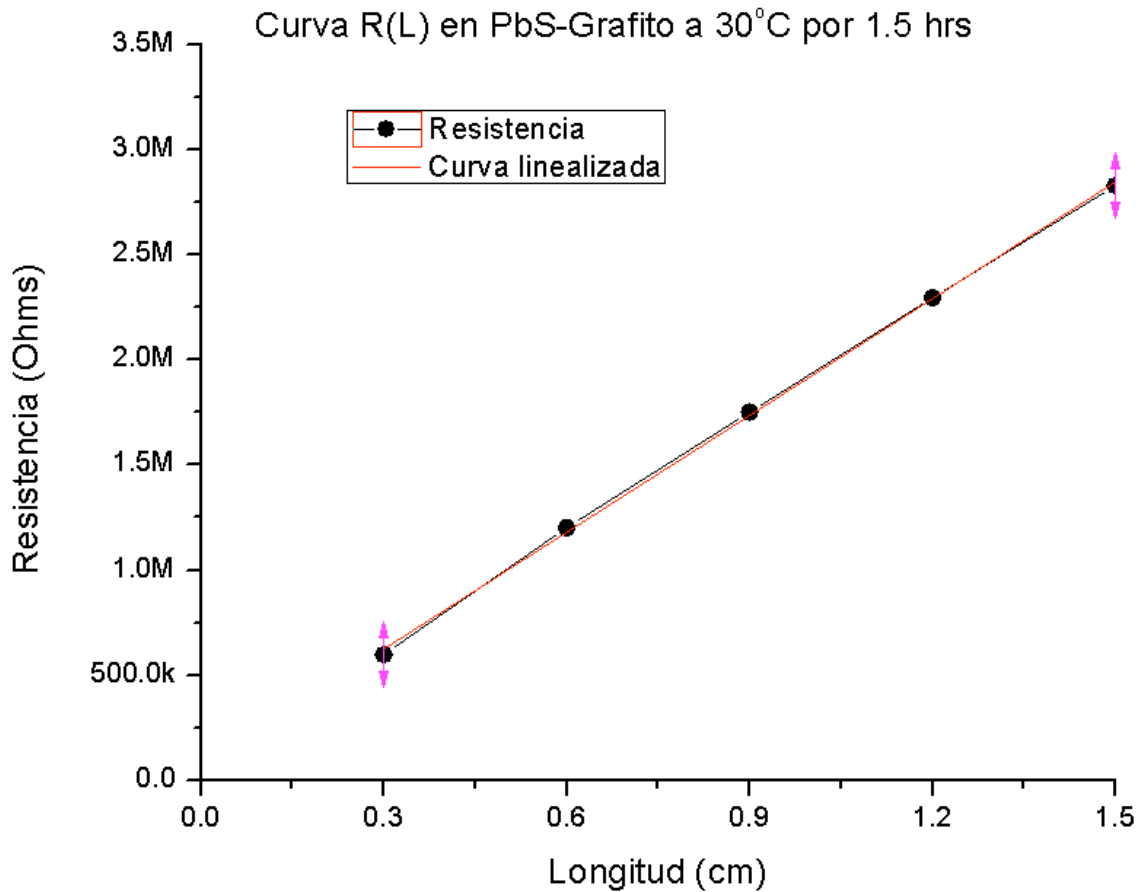


Figura 5.43 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 30 °C por 1.5 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.44 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=129 \text{ k}\Omega$ y pendiente $m=0.614 \times 10^6$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 30°C durante 3 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=44.44 \times 10^{-6} \text{ cm}$, tengamos que $\rho = 3.24 \times 10^1 \Omega \cdot \text{cm}$

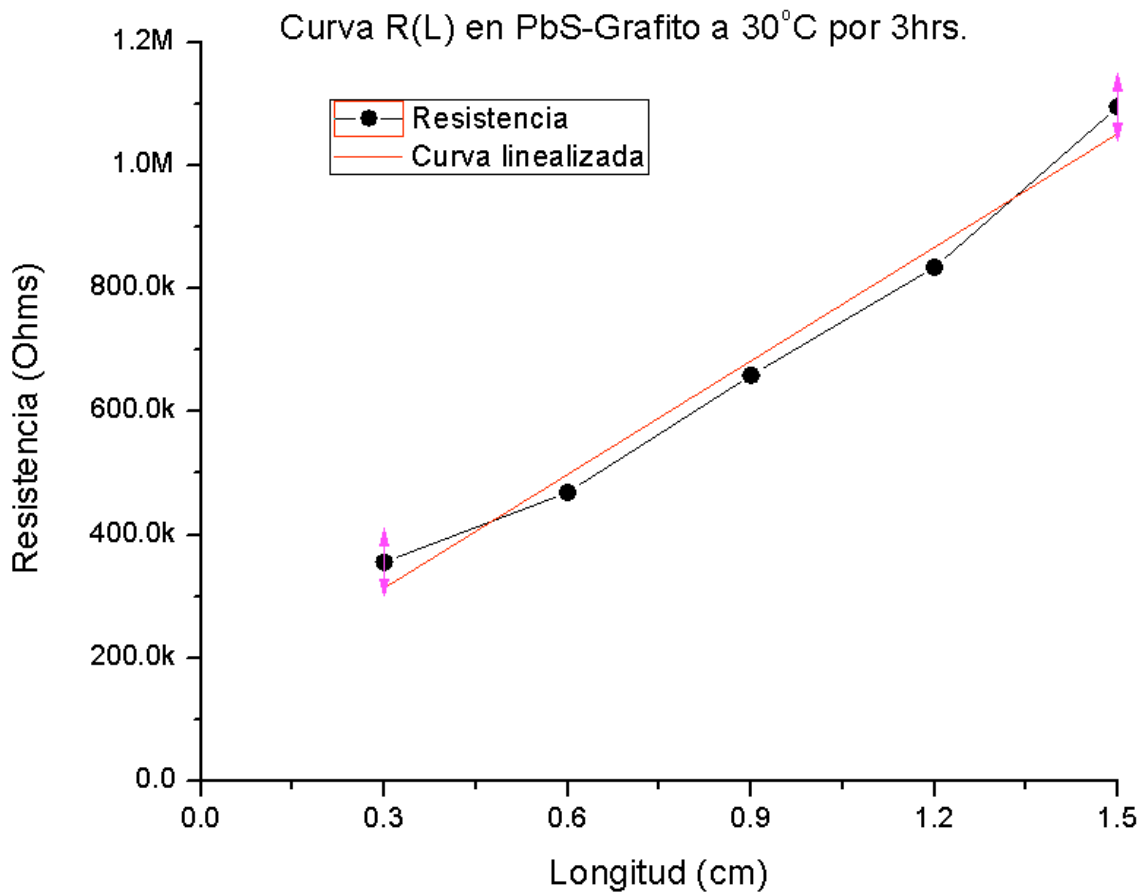


Figura 5.44 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 30 °C por 3 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.45 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=60 \text{ k}\Omega$ y pendiente $m=72.93 \times 10^3$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 30°C durante 4 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=45.1 \times 10^{-6} \text{ cm}$, tengamos que $\rho = 6.916 \times 10^1 \Omega \cdot \text{cm}$

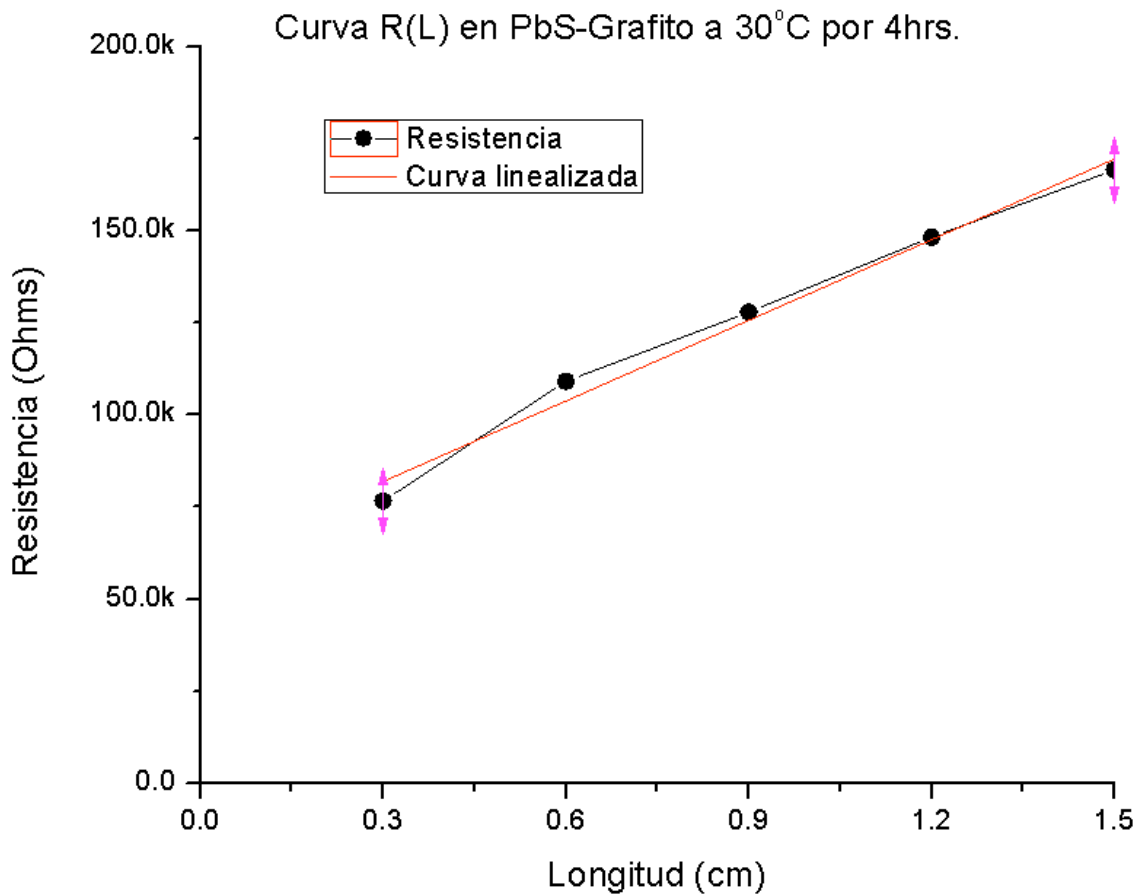


Figura 5.45 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 30 °C por 4 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.46 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=14.65 \text{ k}\Omega$ y pendiente $m=32.99 \times 10^3$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 40°C durante 1.5 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=63.36 \times 10^{-6} \text{ cm}$, tengamos que $\rho = 2.09 \times 10^0 \Omega \cdot \text{cm}$

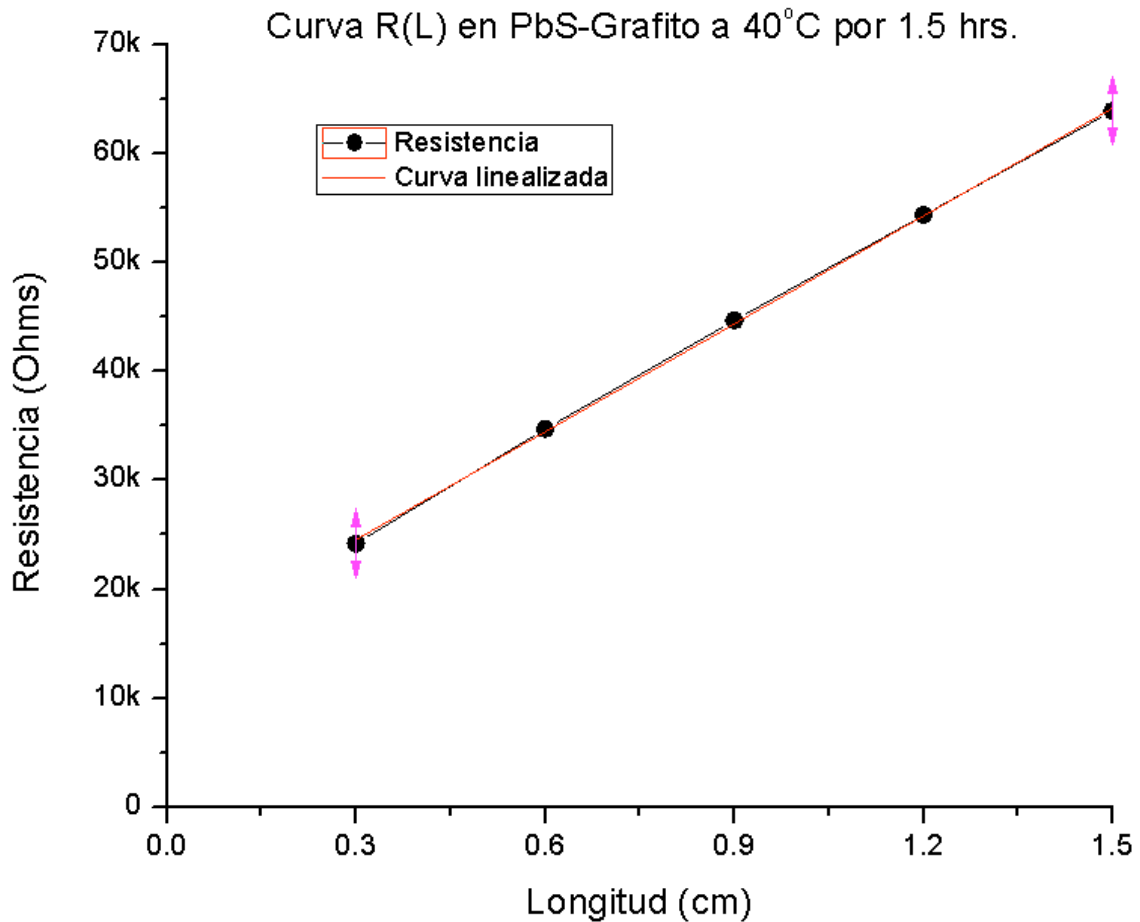


Figura 5.46 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 40 °C por 1.5 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.47 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=12.08 \text{ k}\Omega$ y pendiente $m=9.58 \times 10^3$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 40°C durante 3 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=66.22 \times 10^{-6} \text{ cm}$, tengamos que $\rho = 6.3439 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$

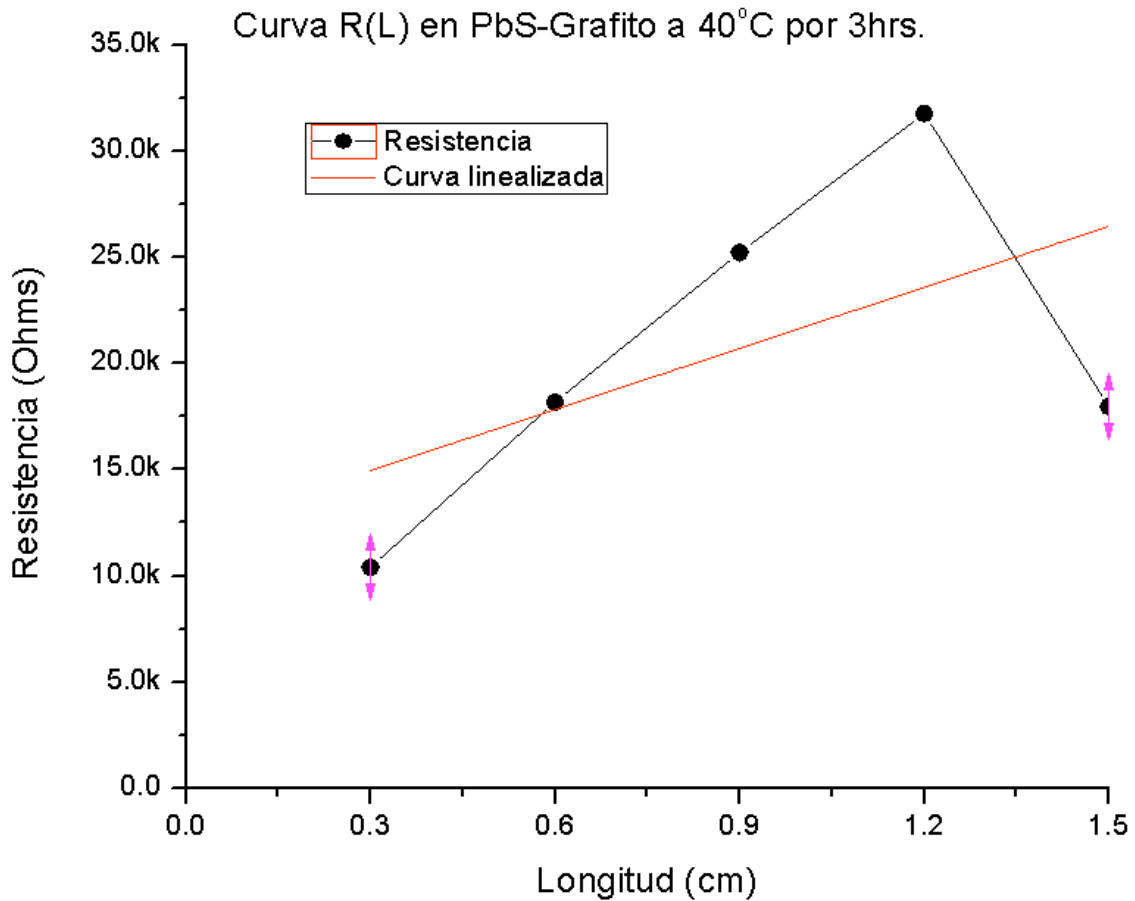


Figura 5.47 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 40 °C por 3 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.48 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=3.35 \text{ k}\Omega$ y pendiente $m=5.42 \times 10^3$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 40°C durante 4 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=69.3 \times 10^{-6} \text{ cm}$, tenemos que $\rho = 3.757 \times 10^0 \Omega \cdot \text{cm}$

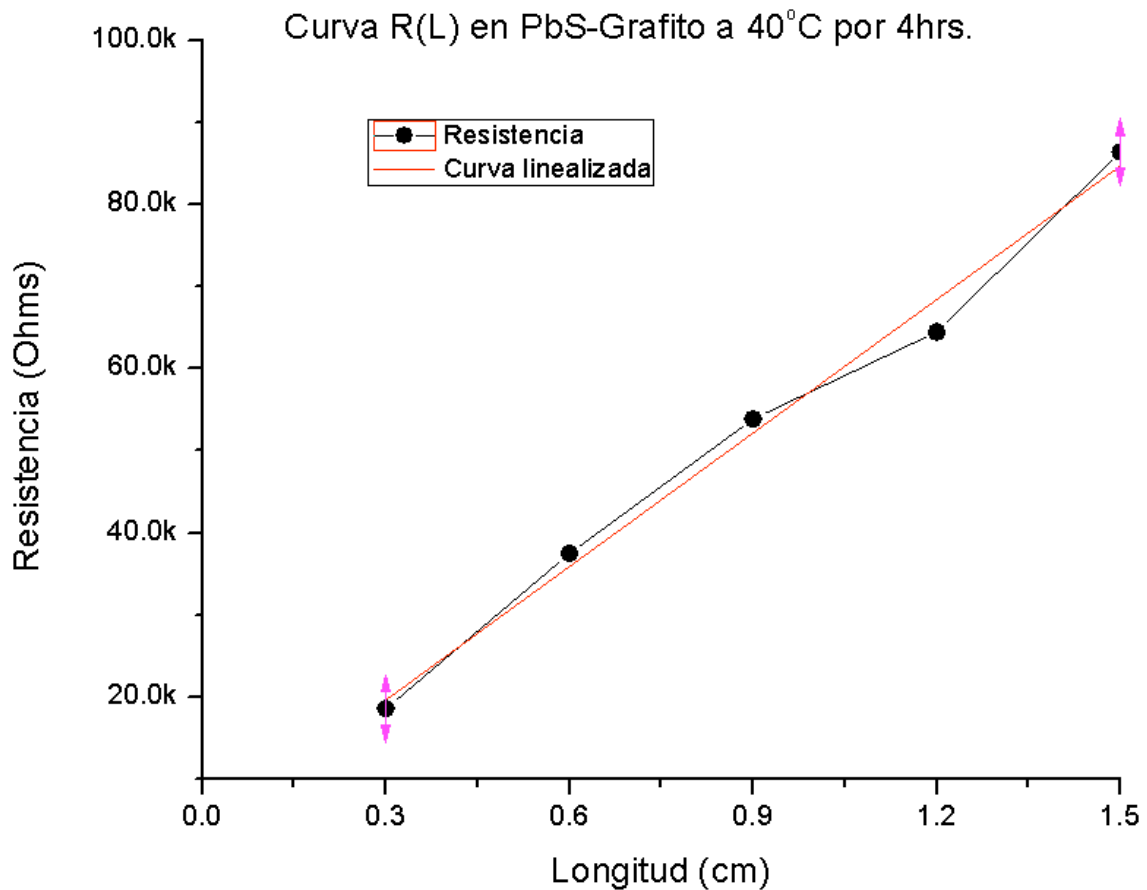


Figura 5.48 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 40 °C por 4 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.49 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=3.87 \text{ k}\Omega$ y pendiente $m=21.57 \times 10^3$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 50°C durante 1 hora.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=39.38 \times 10^{-6} \text{ cm}$, tengamos que $\rho = 8.4958 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$

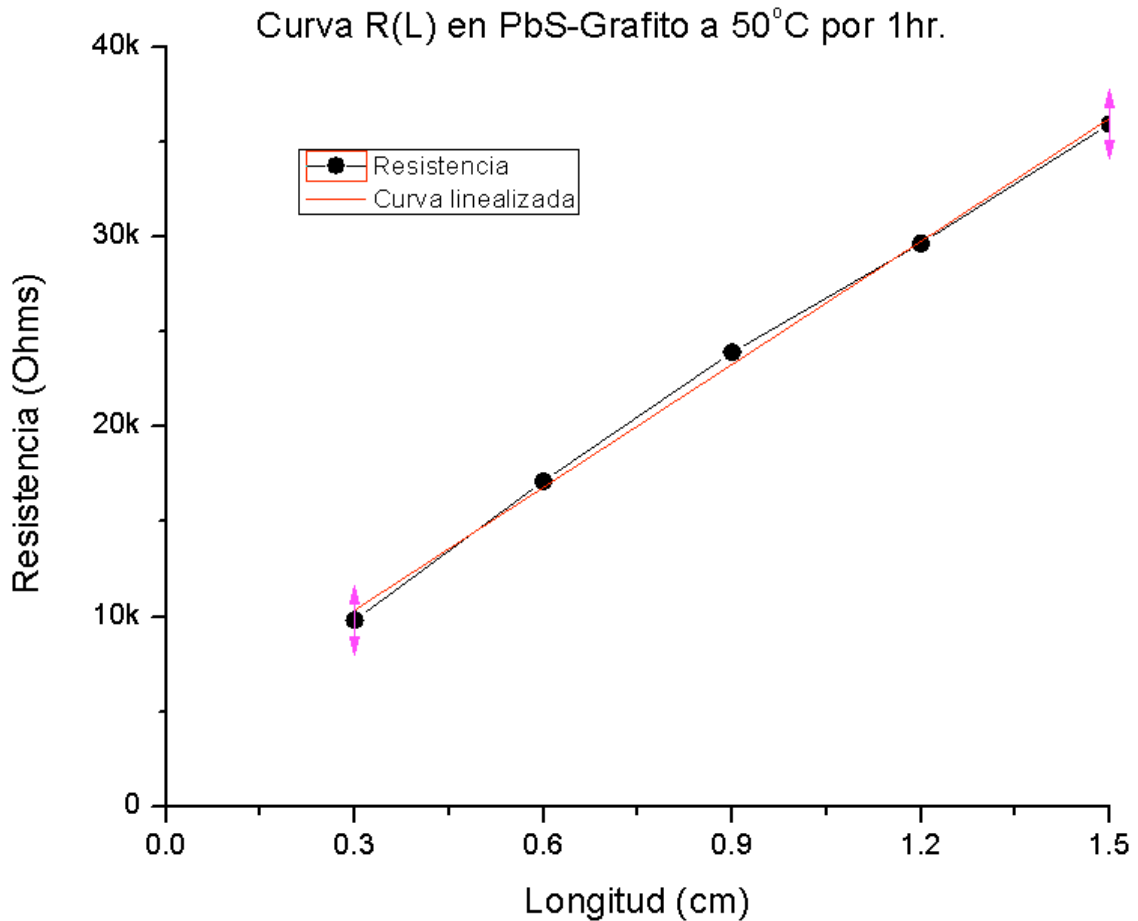


Figura 5.49 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 50 °C por 1 hora con contactos de grafito.

En la figura 5.50 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=4.39$ k Ω y pendiente $m=18.79 \times 10^3$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 50°C durante 2 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=70.4 \times 10^{-6}$ cm, tengamos que $\rho = 1.322 \times 10^0 \Omega \cdot cm$

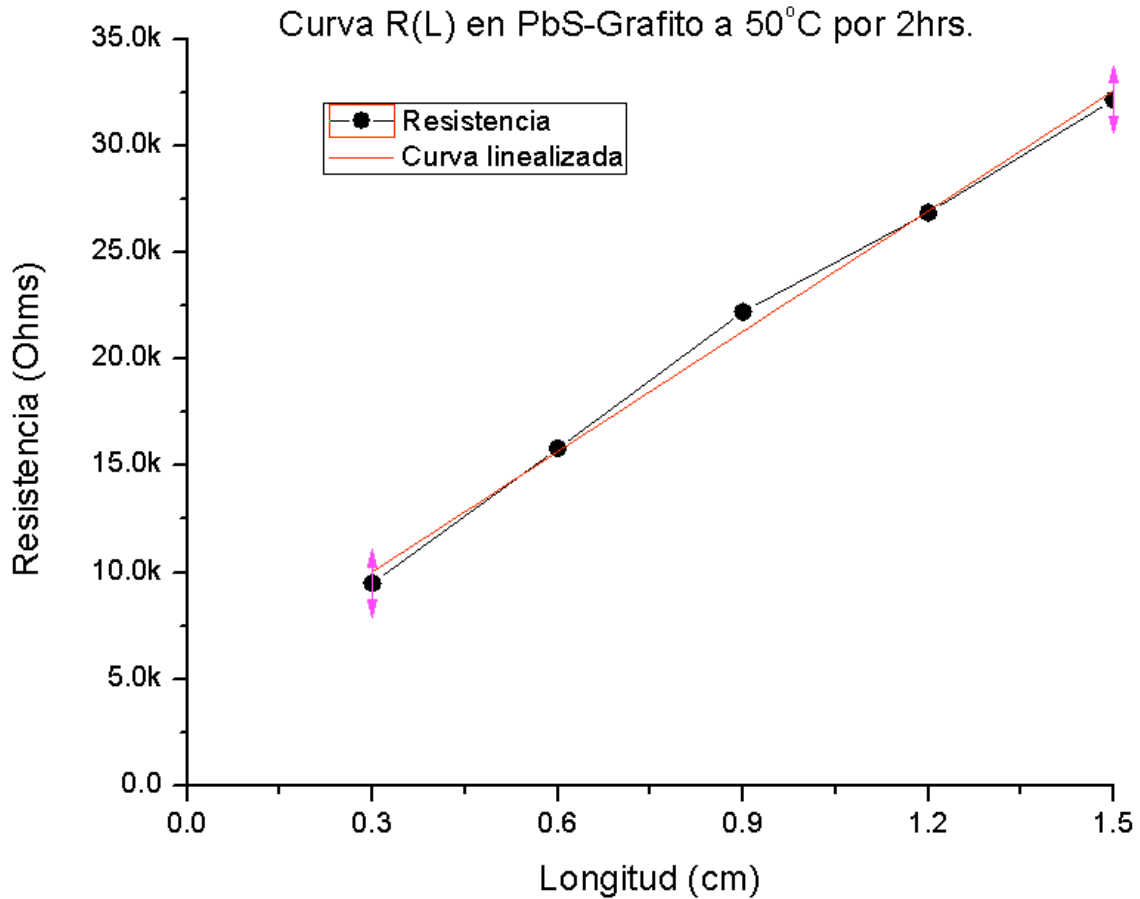


Figura 5.50 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 50 °C por 2 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.51 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=15.11 \text{ k}\Omega$ y pendiente $m=18.12 \times 10^3$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 50°C durante 3 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=79.42 \times 10^{-6} \text{ cm}$, tengamos que $\rho = 1.439 \times 10^0 \Omega \cdot \text{cm}$

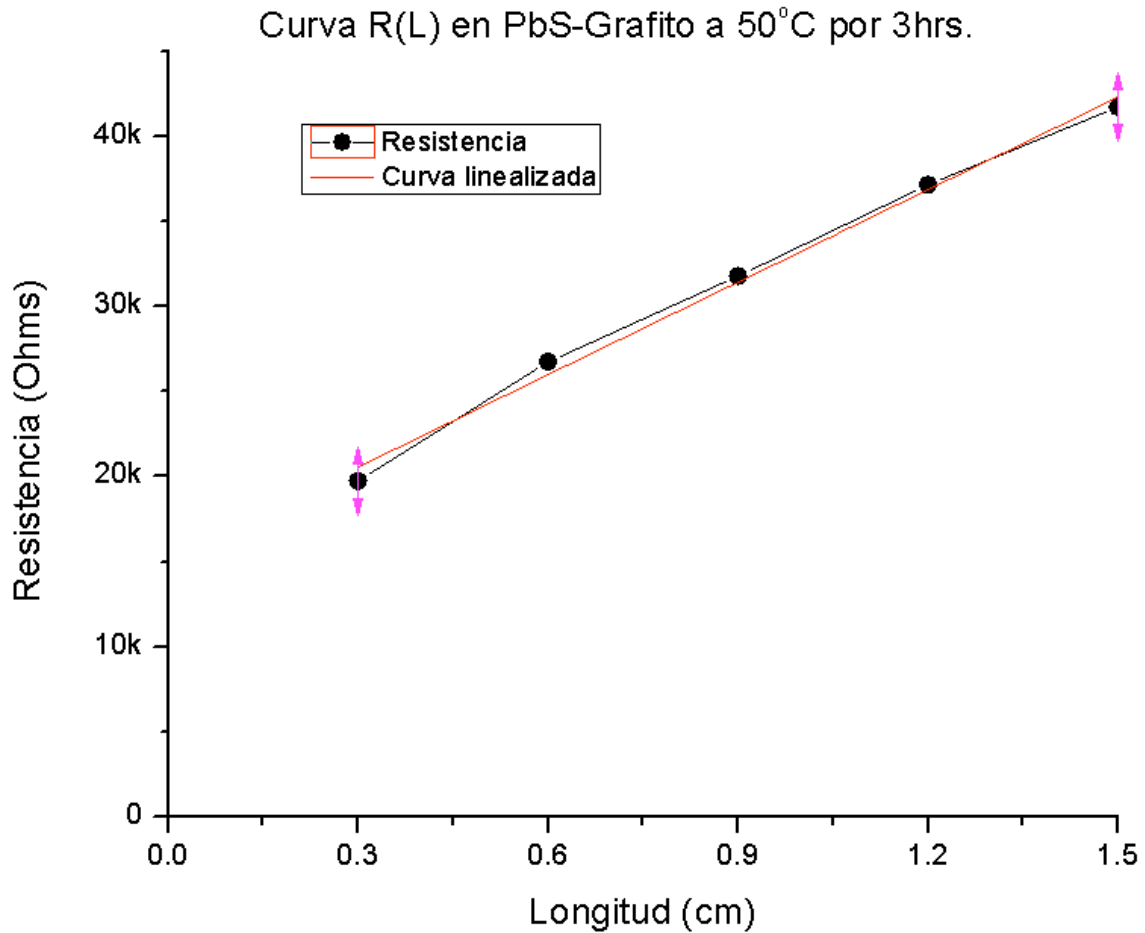


Figura 5.51 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 50 °C por 3 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.52 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=2.63$ k Ω y pendiente $m=5.08 \times 10^3$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 60°C durante 1 hora.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=40.04 \times 10^{-6}$ cm, tengamos que $\rho = 2.034 \times 10^{-1} \Omega \cdot cm$

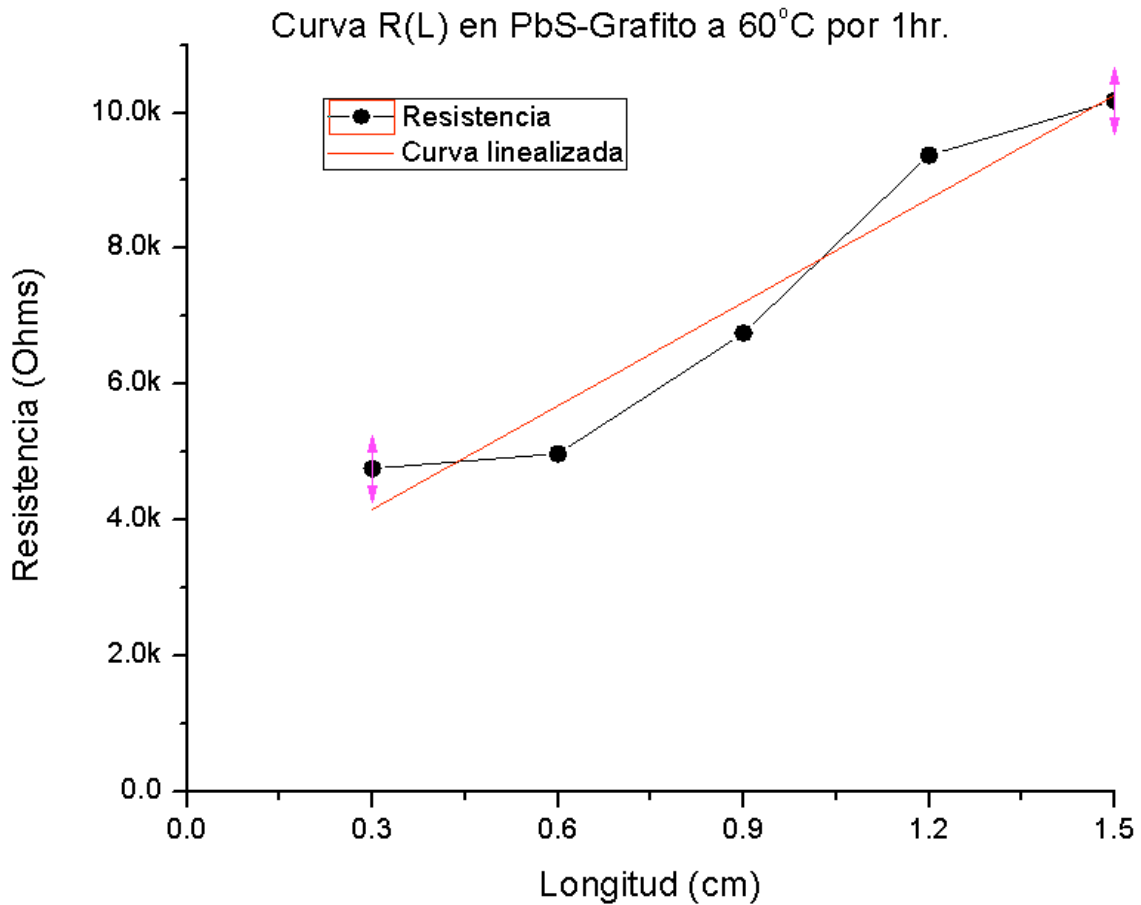


Figura 5.52 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 60 °C por 1 hora con contactos de grafito.

En la figura 5.53 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=2.58 \text{ k}\Omega$ y pendiente $m=5.57 \times 10^3$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 60°C durante 2 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=66.44 \times 10^{-6} \text{ cm}$, tengamos que $\rho = 3.701 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$

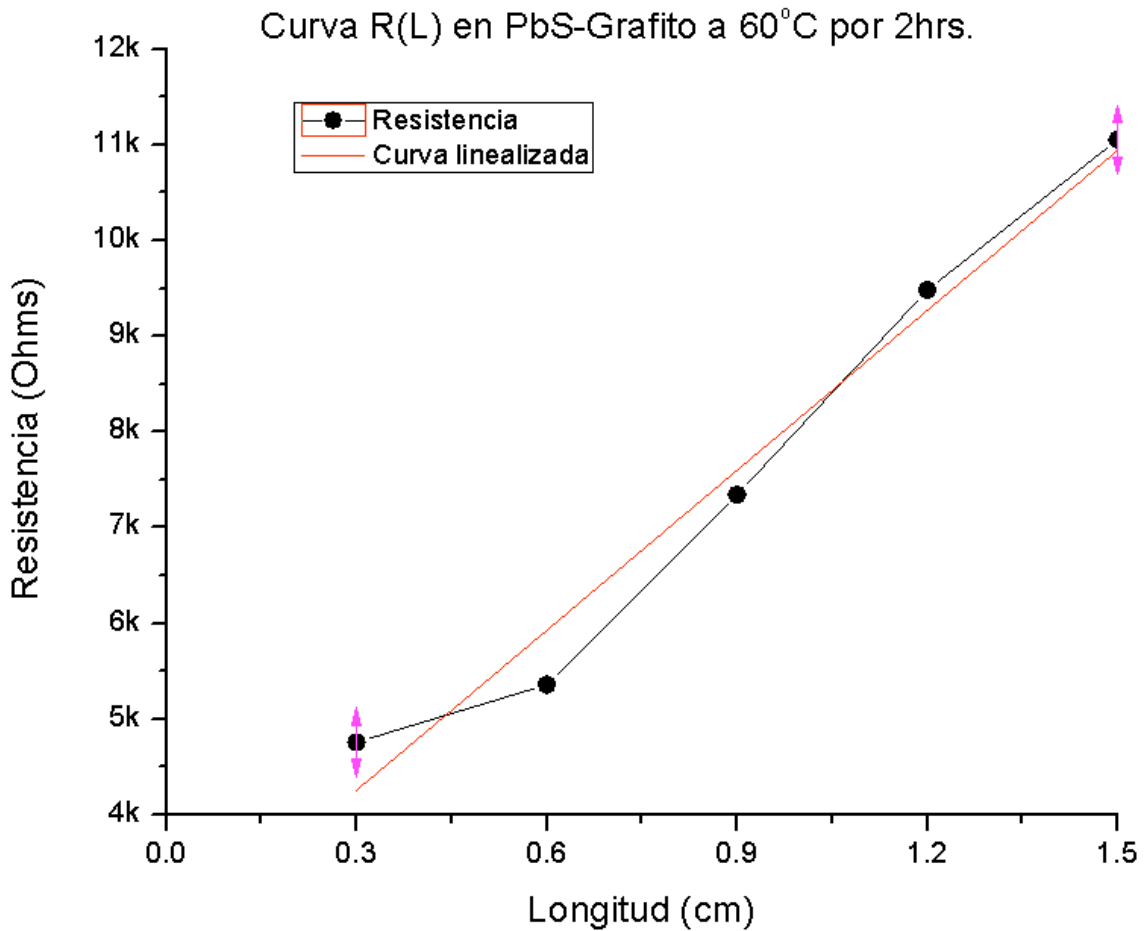


Figura 5.53 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 60 °C por 2 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.54 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=2.34$ k Ω y pendiente $m=8.71 \times 10^3$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 60°C durante 3 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=96.8 \times 10^{-6}$ cm, tengamos que $\rho = 8.432 \times 10^{-1} \Omega \cdot cm$

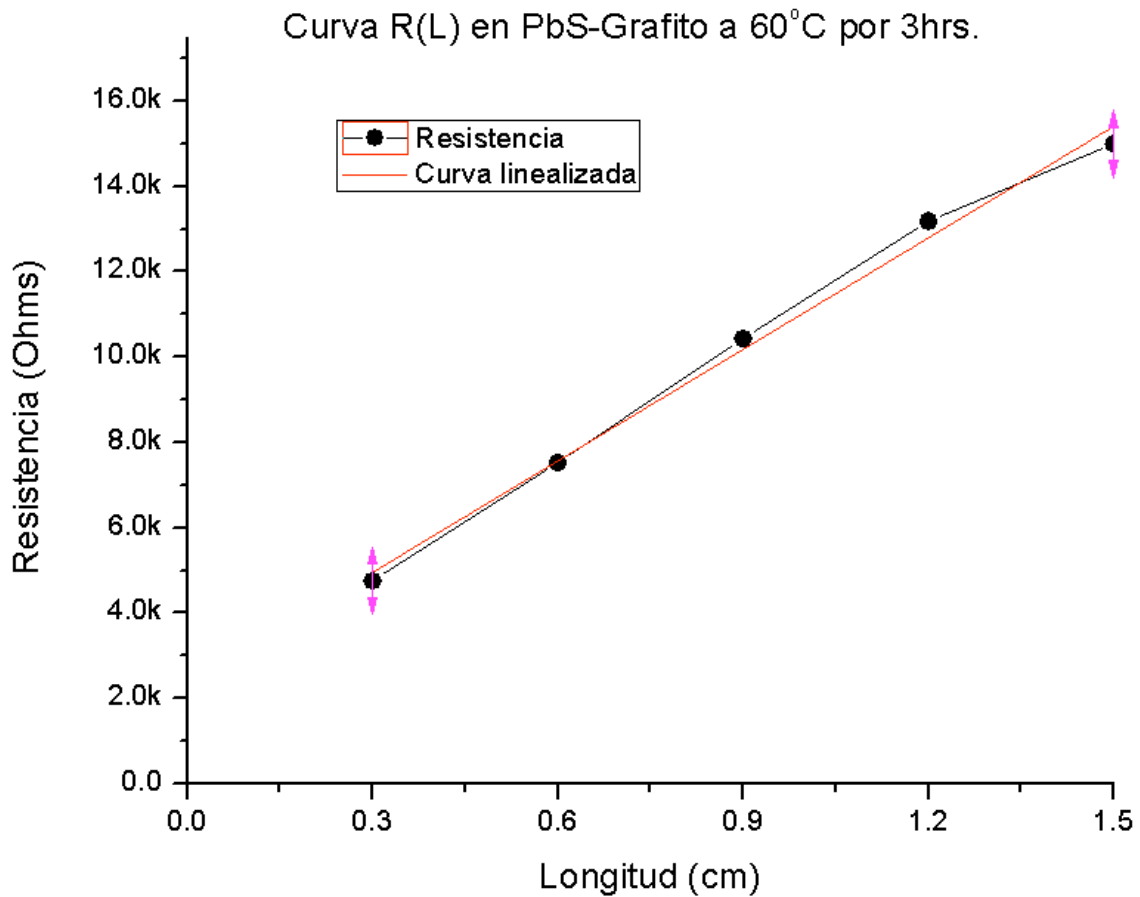


Figura 5.54 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 60 °C por 3 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.55 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=2.66$ k Ω y pendiente $m=6.53 \times 10^3$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 70°C durante 1 hora.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=42.46 \times 10^{-6}$ cm, tengamos que $\rho = 2.7759 \times 10^{-1} \Omega \cdot cm$

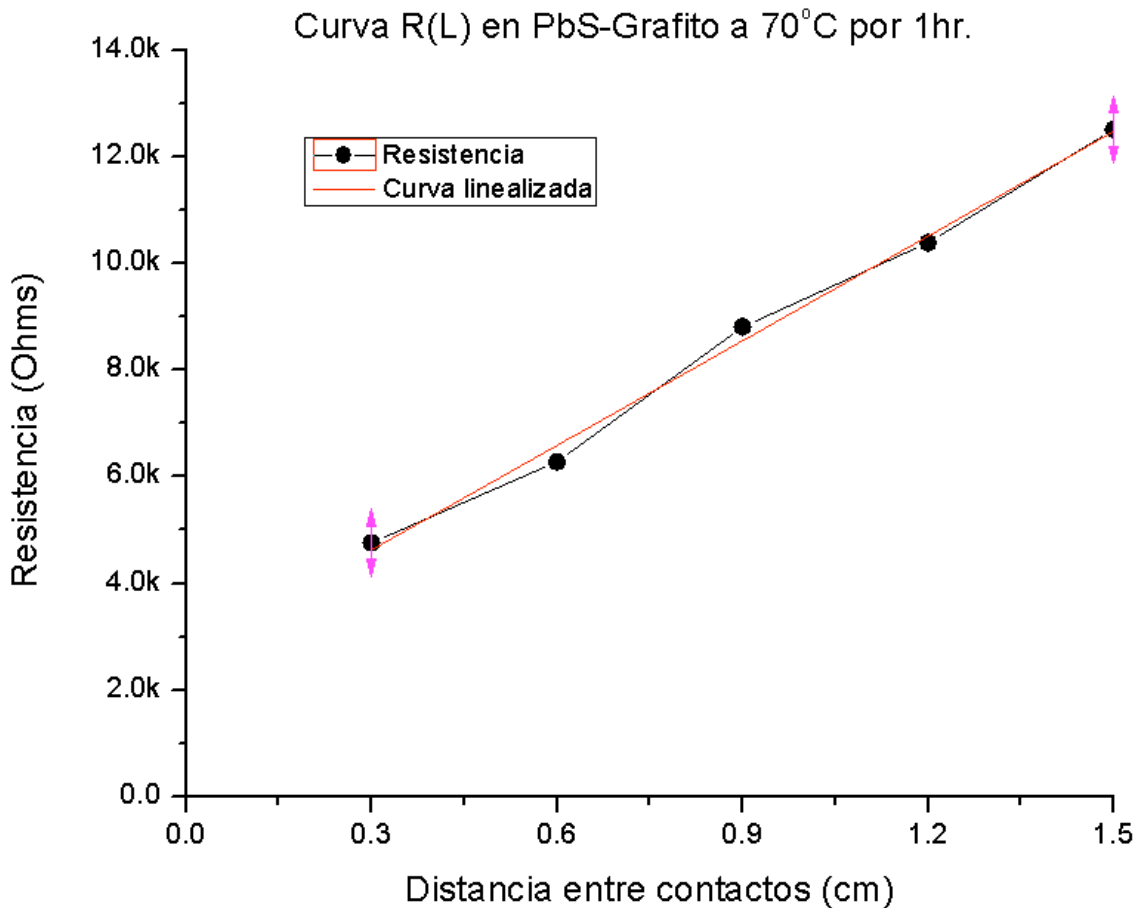


Figura 5.55 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 70 °C por 1 hora con contactos de grafito.

En la figura 5.56 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=2.75 \text{ k}\Omega$ y pendiente $m=4.34 \times 10^3$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 70°C durante 2 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=71.06 \times 10^{-6} \text{ cm}$, tengamos que $\rho = 3.0857 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$

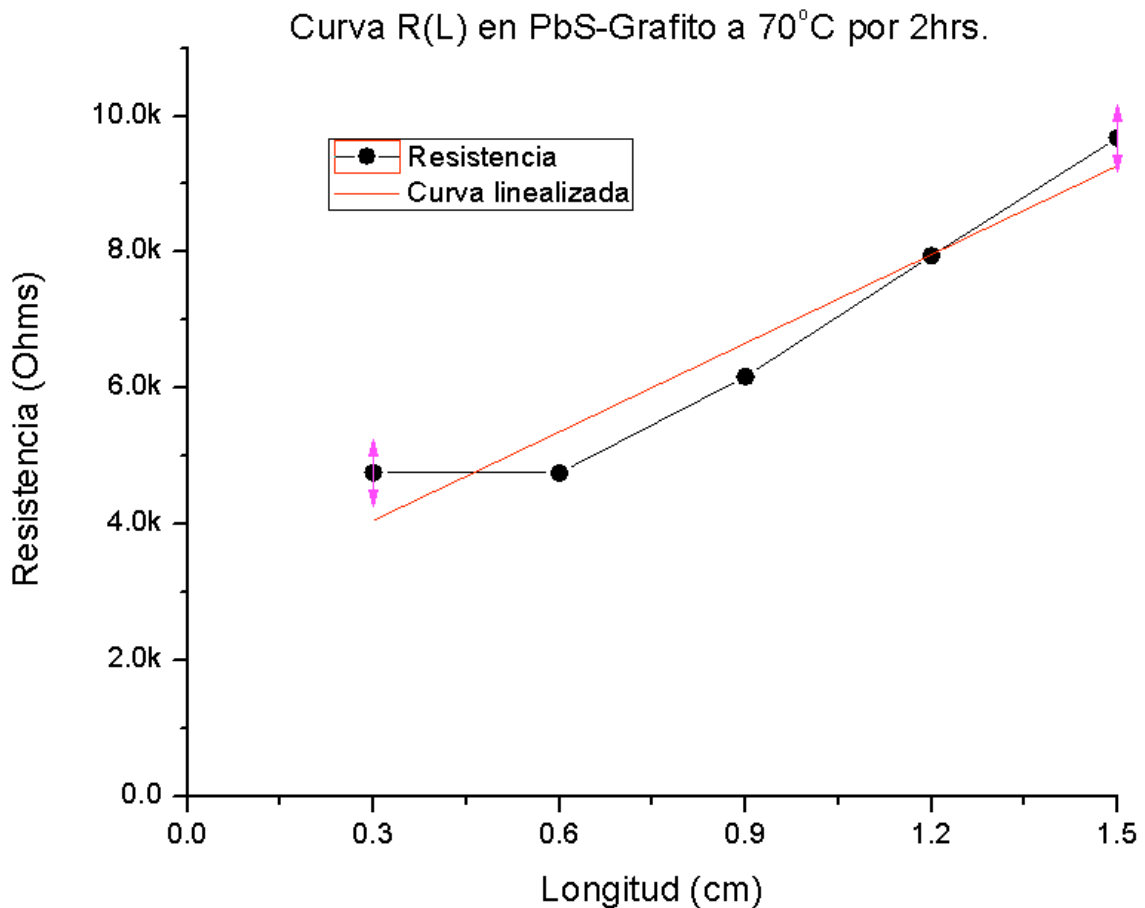


Figura 5.56 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 70 °C por 2 horas con contactos de grafito.

En la figura 5.57 observamos en color negro la curva exacta de los valores de las resistencias a cada una de las distancias y en color rojo se observa la misma curva ya de manera lineal donde obtenemos el valor de la resistencia de contacto $R_c=2.05 \text{ k}\Omega$ y pendiente $m=7.93 \times 10^3$ para la película delgada de sulfuro de plomo depositada a 70°C durante 3 horas.

De tal manera que mediante la fórmula de la resistividad $\rho = mA$, donde para $A=80.52 \times 10^{-6} \text{ cm}$, tengamos que $\rho = 6.3867 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$

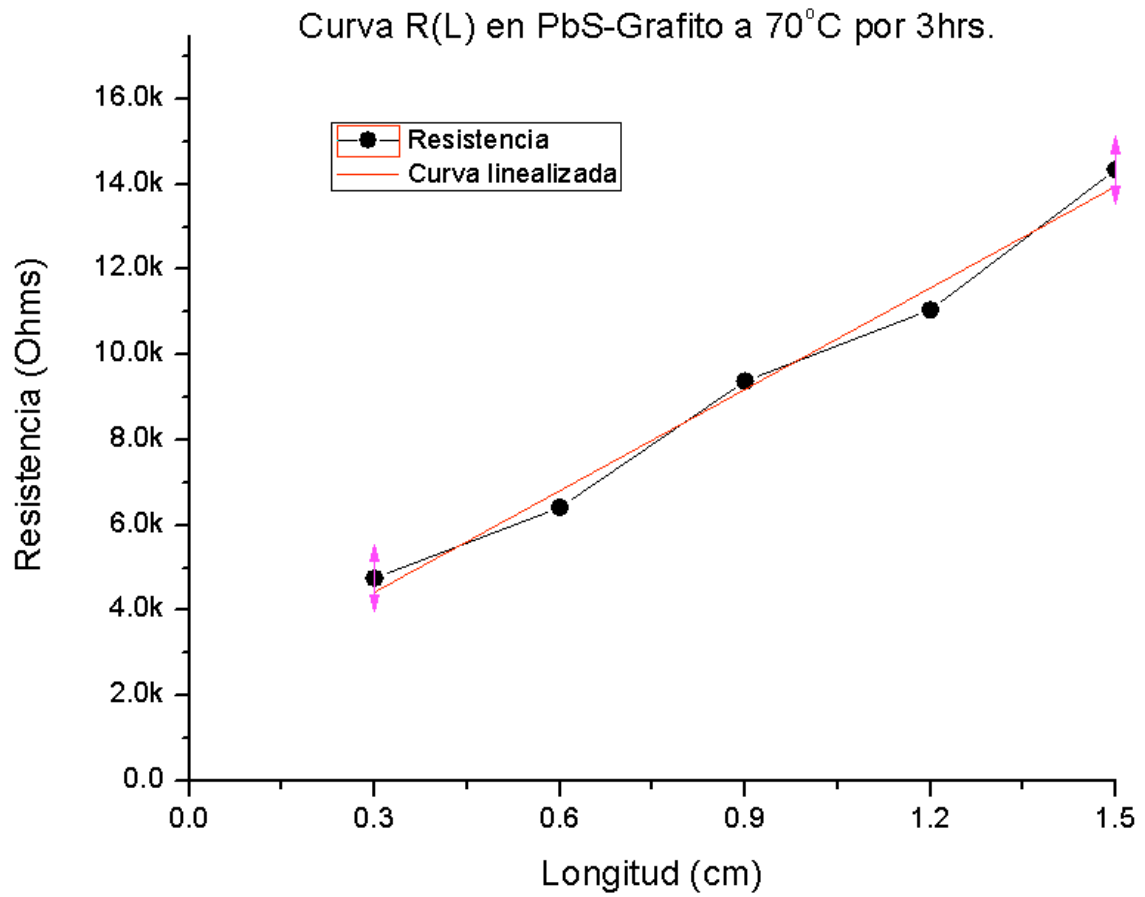


Figura 5.57 Curva $R(L)$ de película delgada de PbS depositada a 70 °C por 3 horas con contactos de grafito.

En la tabla 5.3 se observan de manera clara los valores de resistencia de contacto y resistividad obtenidos para cada una de las temperaturas de depósito.

T (°C)	Tiempo (hrs)	R _c (Ω)	ρ(Ω · cm)
10	3	0	1.9524 x10 ⁴
10	4	0	5.4015 x10 ³
10	5	18.76x10 ⁶	1.9524 x10 ⁴
15	2	9.68 x10 ⁶	1.4132 x10 ³
15	3.5	34.94 x10 ⁶	2.911 x10 ²
15	5	0	4.862 x10 ²
20	2	0	1.23 x10 ⁴
20	3.5	171.71 x10 ³	2.471 x10 ²
20	5	13.59 x10 ³	2.31 x10 ²
30	1.5	69.164 x10 ³	2.529 x10 ¹
30	3	129 x10 ³	3.24 x10 ¹
30	4	60 x10 ³	6.916 x10 ¹
40	1.5	14.65 x10 ³	2.09 x10 ⁰
40	3	12.08 x10 ³	6.3439 x10 ⁰
40	4	3.35 x10 ³	3.747 x10 ⁰
50	1	3.87 x10 ³	8.4958 x10 ⁻¹
50	2	4.39 x10 ³	1.322 x10 ⁰
50	3	15.11 x10 ³	1.439 x10 ⁰
60	1	2.63 x10 ³	2.034 x10 ⁻¹
60	2	2.58 x10 ³	3.701 x10 ⁻¹
60	3	2.34 x10 ³	8.432 x10 ⁻¹
70	1	2.66 x10 ³	2.7759 x10 ⁻¹
70	2	2.75 x10 ³	3.00857 x10 ⁻¹
70	3	2.05 x10 ³	6.3867 x10 ⁻¹

Tabla 5.3 Valores de resistencia de contacto y resistividad para cada una de las películas

5.4 Curvas ρ-T

Una vez obtenidas las resistividades de todas las películas delgadas de sulfuro de plomo con contactos de grafito se procedió a realizar las curvas de temperatura contra resistividad. Esto para tener una idea clara de cómo influye la temperatura de depósito del material en su resistividad eléctrica.

En la figura 5.58 se observa la gran disminución en la resistividad mediante el aumento en la temperatura de depósito, todo esto para las películas depositadas a los tiempos más cortos de cada una de las temperaturas.

Aunque en el cambio de 15 a 20 grados vemos un aumento en la resistividad, podemos decir que la tendencia es a ir bajando la misma mientras que la temperatura de depósito aumenta.

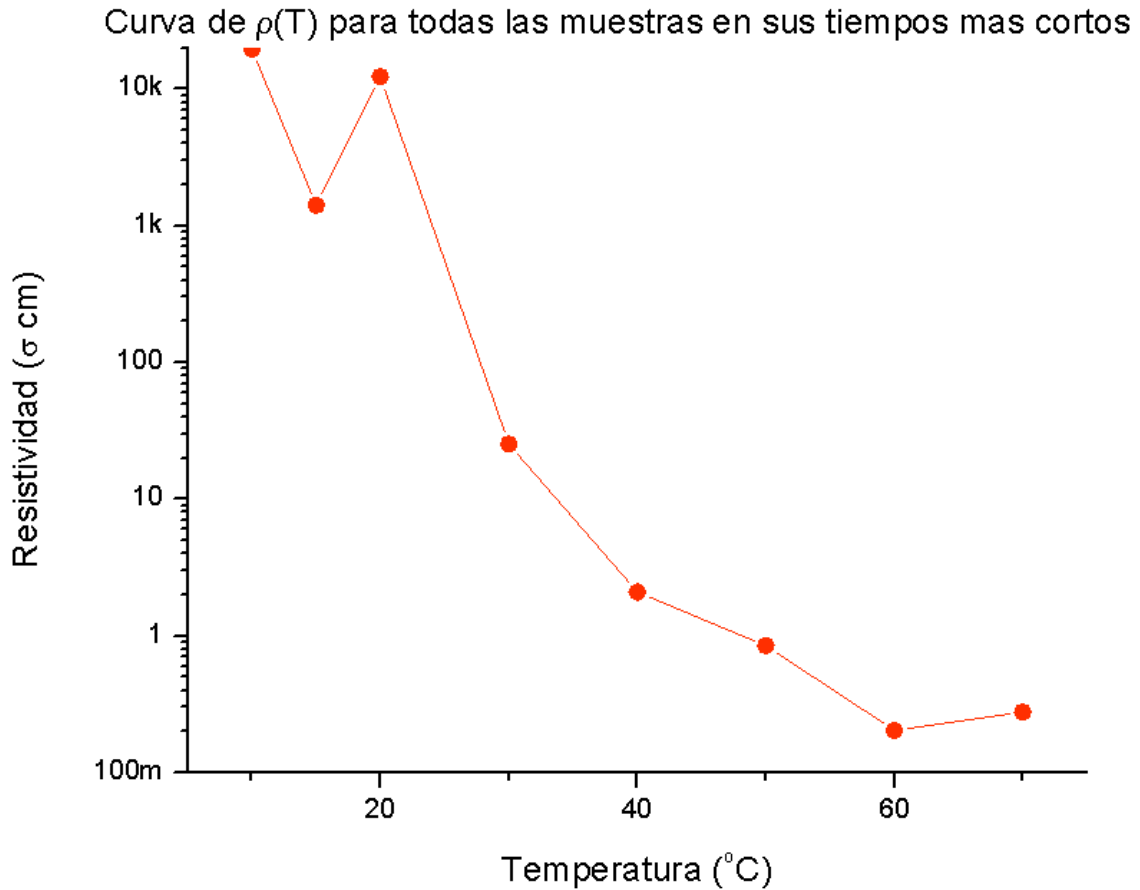


Figura 5.58 Curvas ρ -T de películas delgadas de PbS con contactos de grafito depositadas a 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 y 70 °C con los tiempos más cortos de depósito en cada una de ellas.

En la figura 5.59 se observa la gran disminución en la resistividad mediante el aumento en la temperatura de depósito, en este caso para las películas depositadas a los tiempos medios de cada una de las temperaturas.

En este caso es posible afirmar que la tendencia de la resistividad de las películas es ir disminuyendo mientras aumentamos la temperatura de depósito.

Es posible apreciar claramente la tendencia entre los valores de temperatura de 40 a 70 grados donde a pesar de que entre los valores de 40 y 50 grados la resistividad tiene un aumento, la tendencia podemos decir que es la misma (tiende a disminuir con el aumento de la temperatura de depósito).

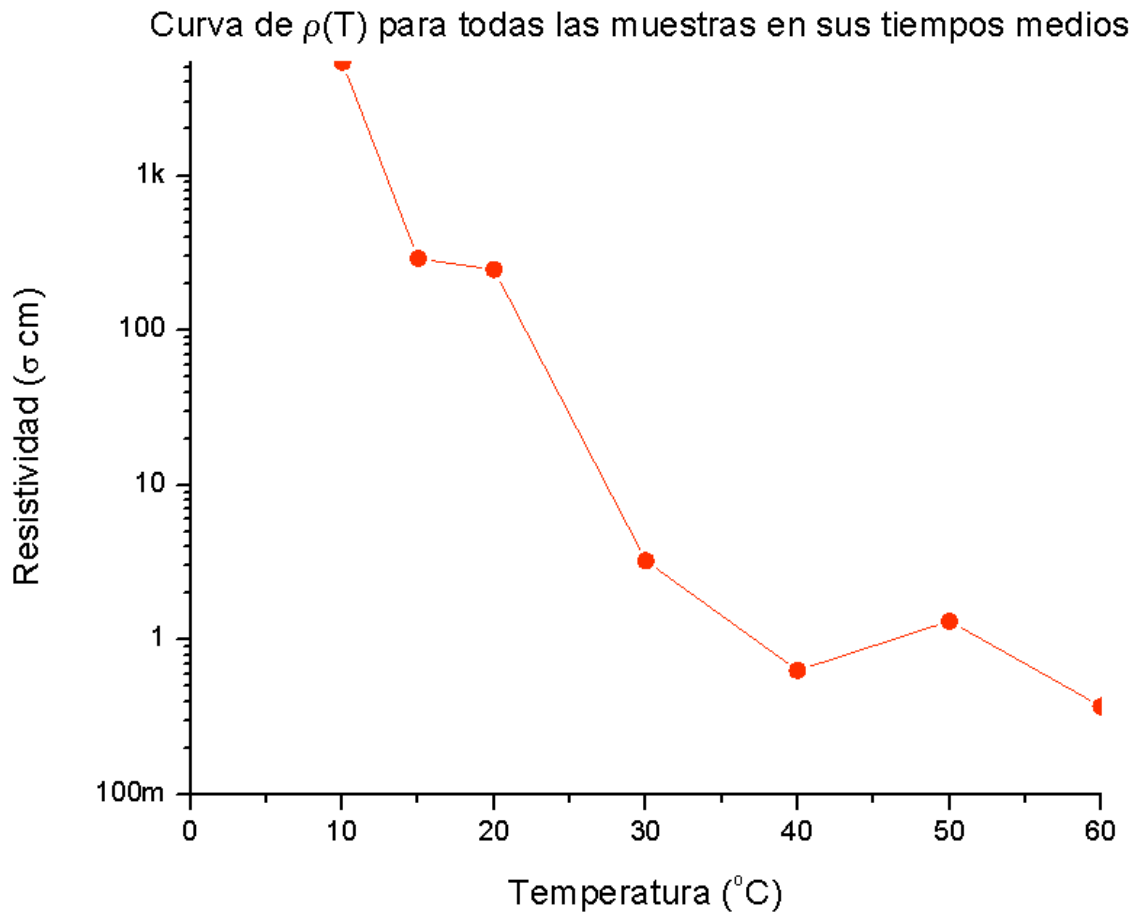


Figura 5.59 Curvas ρ -T de películas delgadas de PbS con contactos de grafito depositadas a 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 y 70 °C con los tiempos medios de depósito en cada una de ellas.

En las figuras 5.60 se observa la gran disminución en la resistividad mediante el aumento en la temperatura de depósito, todo esto para las películas depositadas a los tiempos más largos de cada una de las temperaturas.

Con estos resultados es posible afirmar de manera precisa que la tendencia de la resistividad de las películas es ir disminuyendo mientras aumentamos la temperatura de depósito.

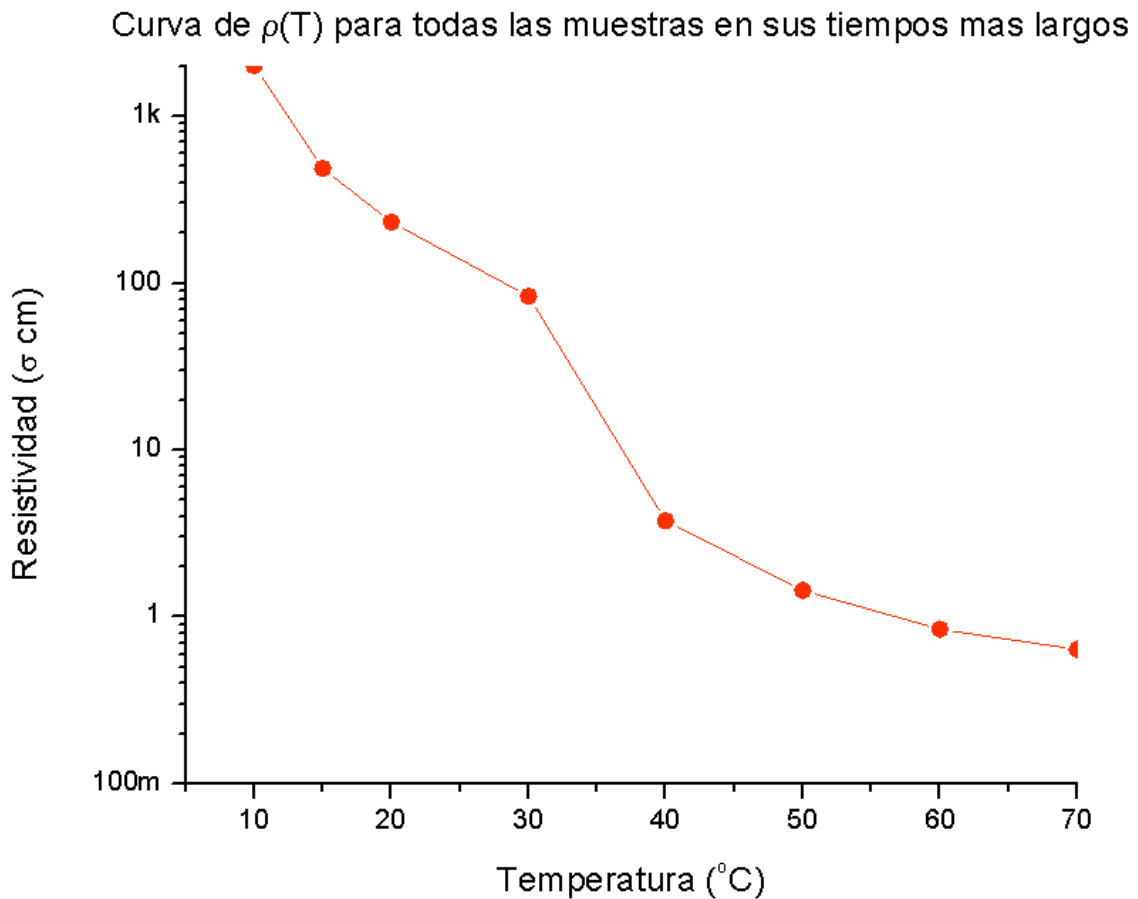


Figura 5.60 Curvas ρ -T de películas delgadas de PbS con contactos de grafito depositadas a 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 y 70 °C con los tiempos más largos de depósito en cada una de ellas.

Después de observar las gráficas y notar su gran cambio en ordenes de conductividad mediante el aumento en la temperatura de depósito, cabe mencionar que esto se debe a que las películas al ser depositadas a menor temperatura, se muestran más porosas con respecto a las depositadas a más temperatura que se observan mucho más compactas lo que incrementa su conductividad notoriamente.

5.5 Curvas de corriente con luz y sin luz

Esta parte del proyecto de investigación consiste en conocer la influencia que tiene sobre los resultados de $I-V$ que las películas sean medidas en un entorno completamente oscuro ó en un entorno con alta iluminación.

Las mediciones se hicieron a 8 películas diferentes, se tomó la película con el tiempo medio de depósito para cada una de las temperaturas, es decir, para la película de 10°C a la cual se hicieron depósitos de 3, 4 y 5 horas se tomó la película depositada por 4 horas por ser la del tiempo medio y así sucesivamente con las demás películas de 15, 20, 30, 40, 50, 60 y 70 grados.

Para cada película se hicieron 3 comparaciones $I-V$ con luz y sin luz. La primera entre los contactos A-B, la segunda entre los contactos A-C y la tercera entre los contactos A-D.

Es necesario mencionar que el equipo utilizado para realizar estas mediciones de $I-V$ presentó un problema en el software, el cual no permitía realizar barridos de voltaje positivos. Pero como mediante los resultados obtenidos en el apartado 5.3 uno se puede dar cuenta que la respuesta para los valores negativos de voltaje es prácticamente igual a la dada en los valores positivos, procedimos a hacer un barrido de -10 a -8 volts, simplemente para en esos dos volts lograr ver la diferencia de respuesta entre la película en la oscuridad ó en un cuarto totalmente iluminado.

En las figuras 6.61, 5.62 y 5.63 observamos los resultados para la película depositada a 10°C entre los contactos A-B, A-C y A-D respectivamente para cada una de ellas, donde las curvas en color negro representan las corrientes medidas en un cuarto con total oscuridad y las curvas en color rojo las de las medidas en cuarto iluminado.

En estas primeras tres figuras mencionadas notamos con claridad como la película gana conductividad cuando esta se encuentra en un lugar iluminado y a su vez tiende a hacerse más resistiva al oscurecer el ambiente, nótese también que la diferencia disminuye al ir tomando contactos más alejados para la medición.

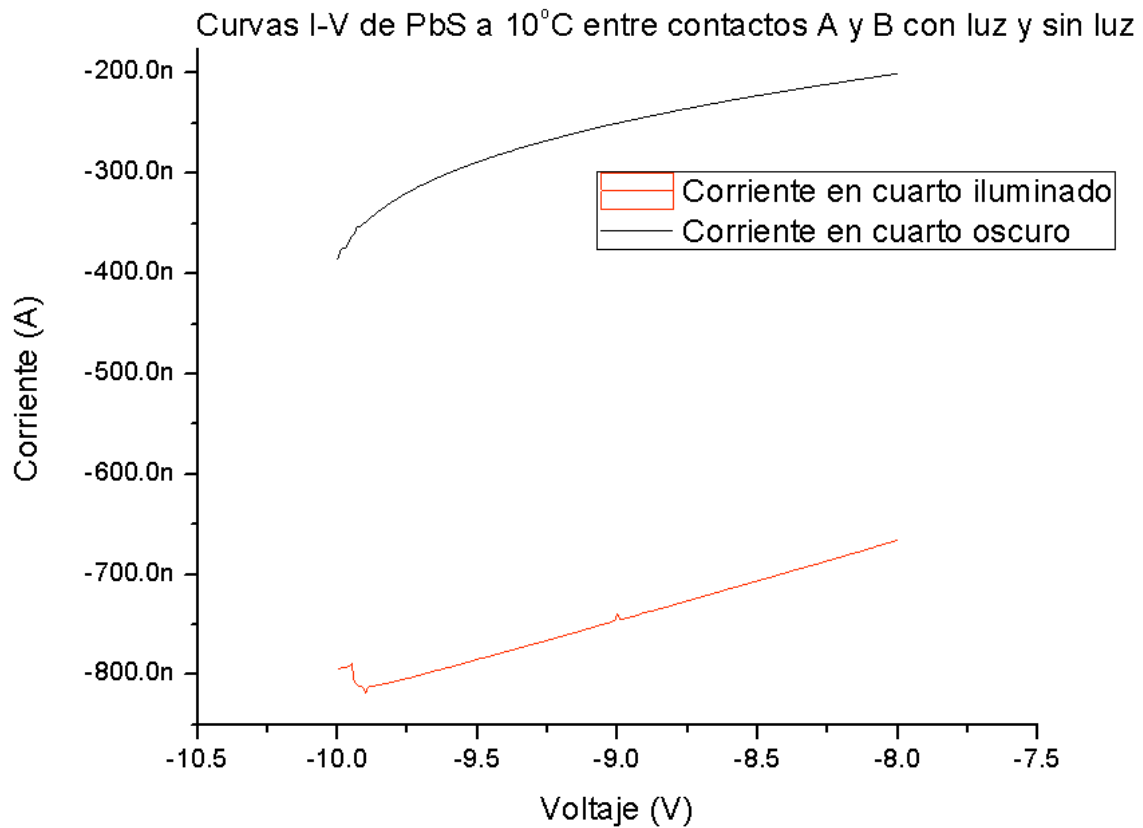


Figura 5.61 Curvas de $I-V$ para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 10°C por 4 horas, medidas en los contactos A-B sin luz en negro y con luz en rojo.

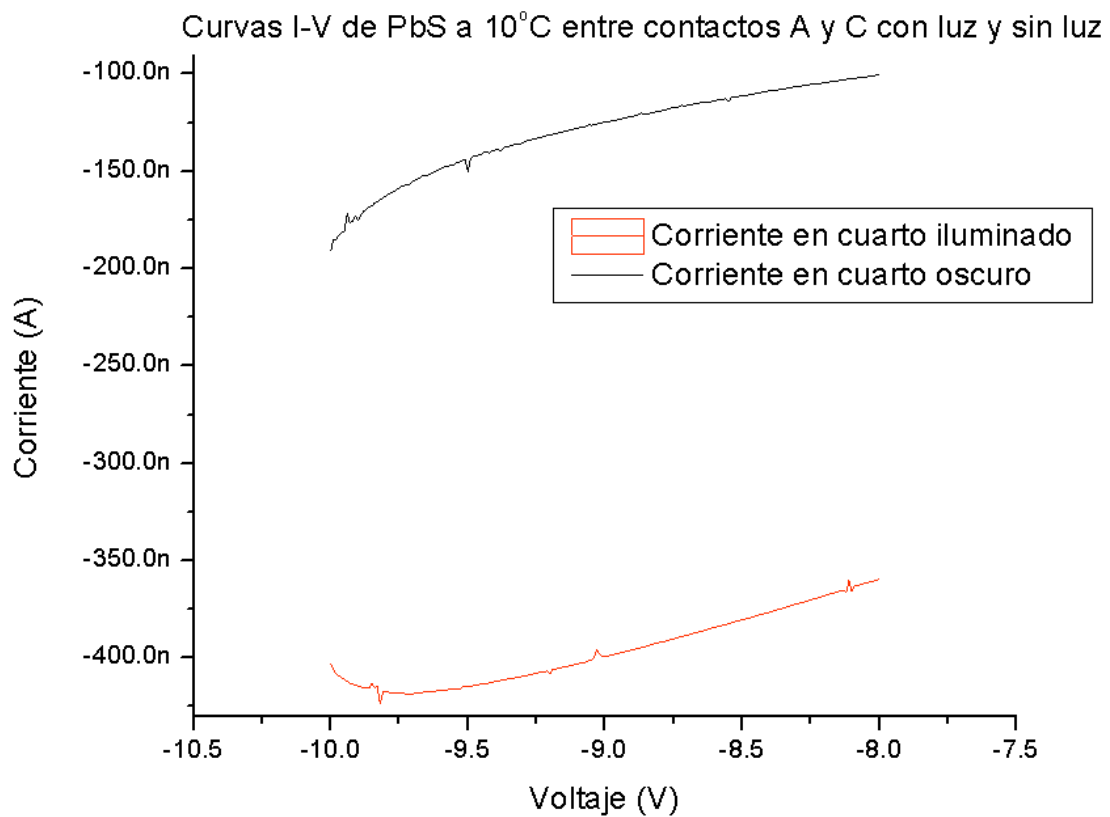


Figura 5.62 Curvas de $I-V$ para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 10°C por 4 horas, medidas en los contactos A-C sin luz en negro y con luz en rojo.

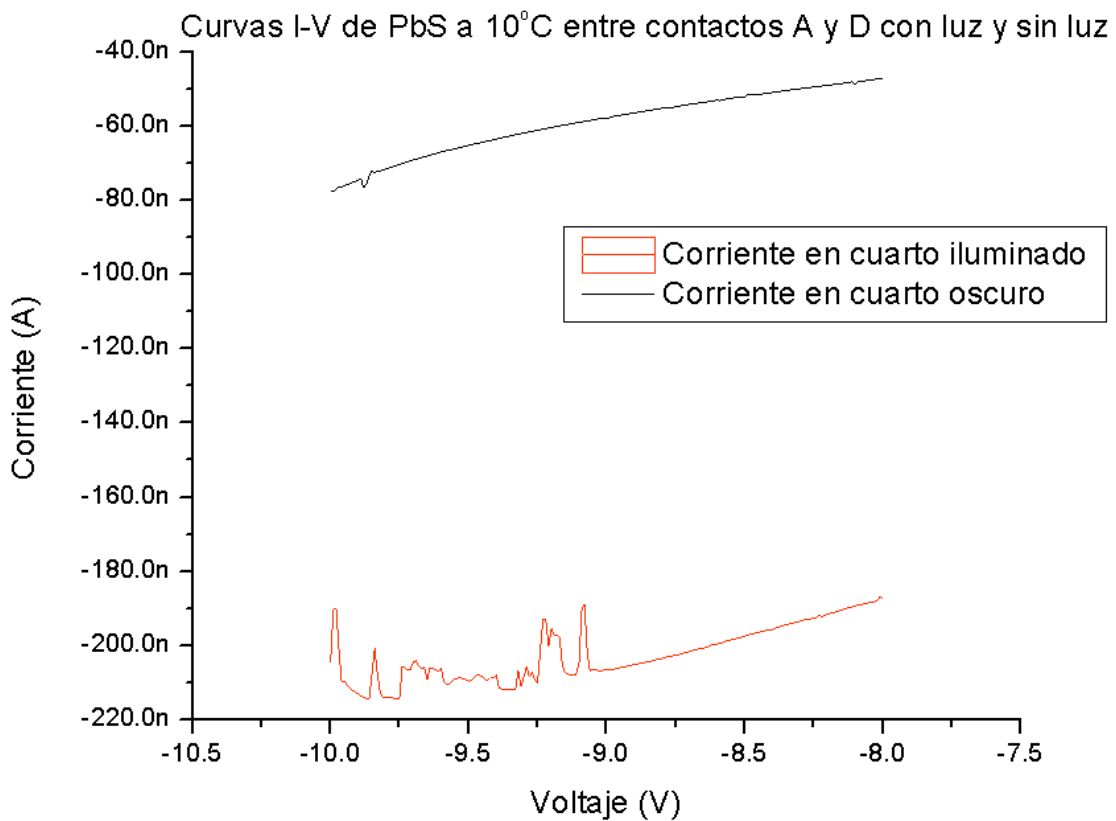


Figura 5.63 Curvas de $I-V$ para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 10°C por 4 horas, medidas en los contactos A-D sin luz en negro y con luz en rojo.

En las figuras 5.64, 5.65 y 5.66 observamos los resultados para la película depositada a 15°C entre los contactos A-B, A-C y A-D respectivamente para cada una de ellas, donde las curvas en color rojo representan las corrientes medidas en un cuarto iluminado y las curvas en color negro las de las medidas en cuarto con total oscuridad.

Al igual que en las películas depositadas a 10°C en estas, notamos que las películas son más conductoras al momento que se encuentran en un lugar iluminado, disminuyendo también la diferencia a la vez que tomamos contactos más alejados.

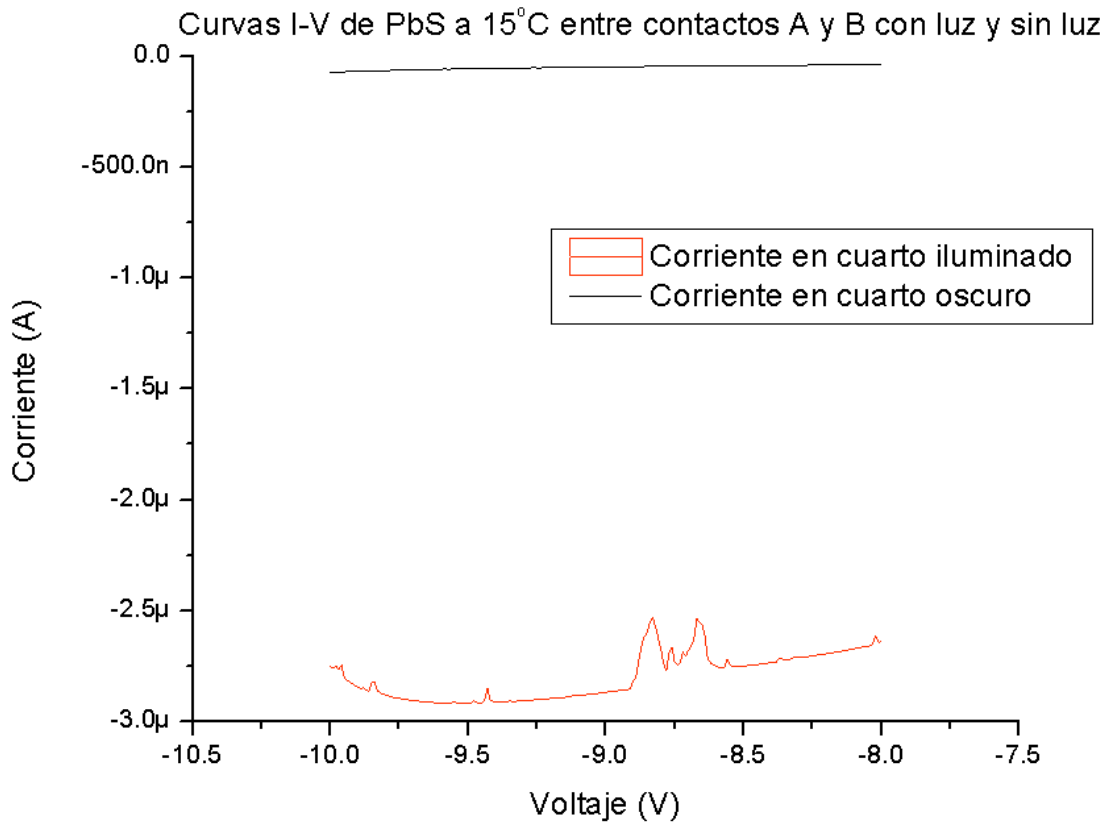


Figura 5.64 Curvas de I-V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 15°C por 3.5 horas, medidas en los contactos A-B sin luz en negro y con luz en rojo.

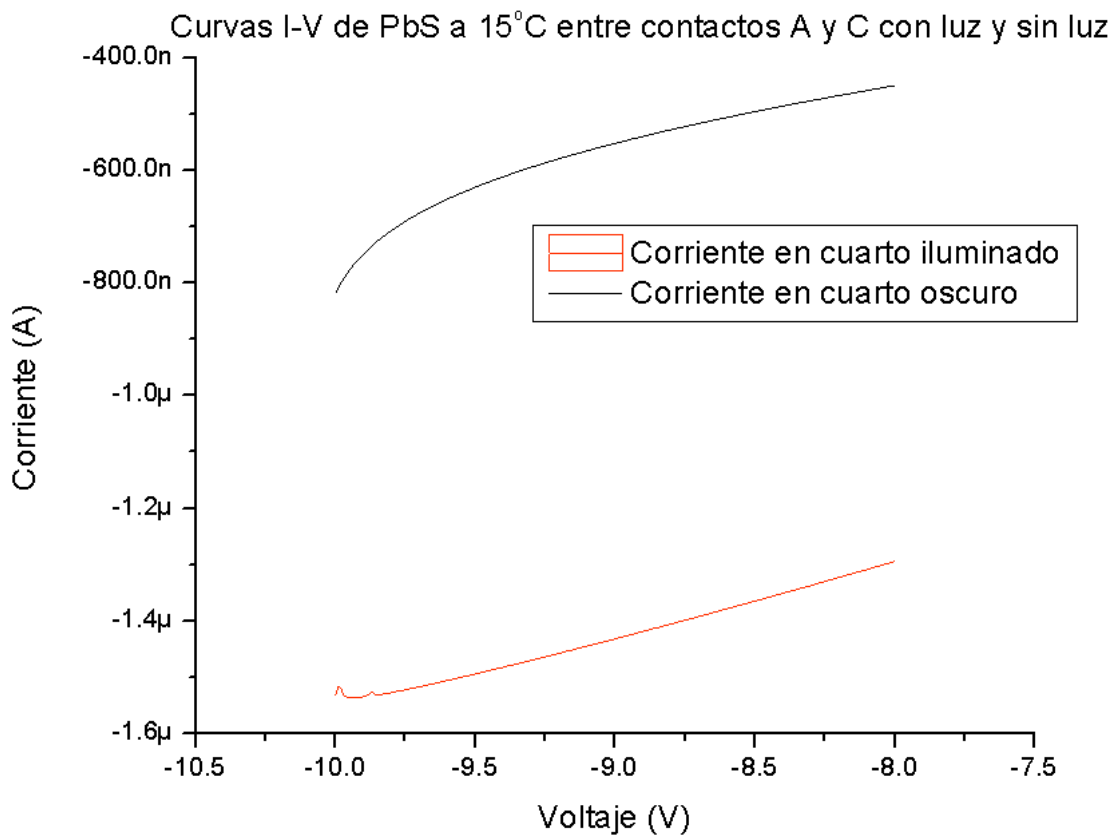


Figura 5.65 Curvas de I-V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 15°C por 3.5 horas, medidas en los contactos A-C sin luz en negro y con luz en rojo.

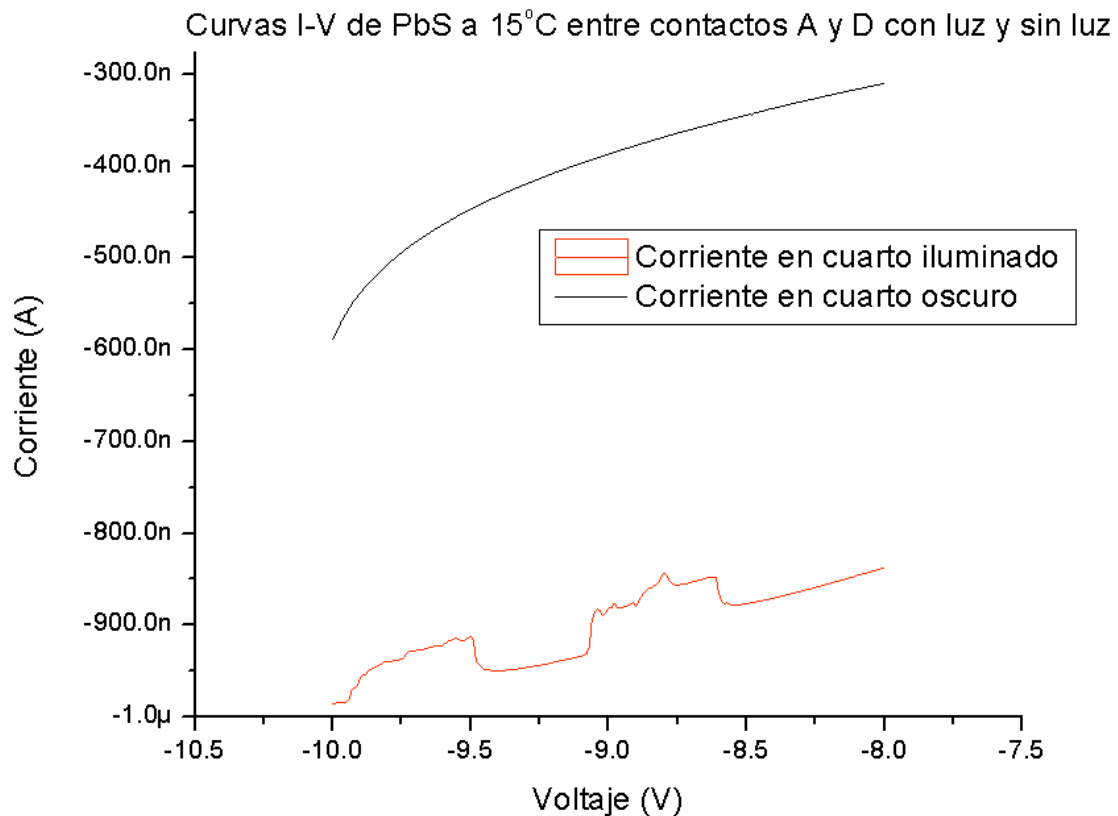


Figura 5.66 Curvas de I-V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 15°C por 3.5 horas, medidas en los contactos A-D sin luz en negro y con luz en rojo.

En las figuras 5.67, 5.68 y 5.69 observamos los resultados para la película depositada a 20°C entre los contactos A-B, A-C y A-D respectivamente para cada una de ellas, donde las curvas en color negro representan las corrientes medidas en un cuarto con total oscuridad y las curvas en color rojo las de las medidas en cuarto iluminado.

A diferencia de las películas comparadas anteriormente, en estas mediciones se observa que ya nuestra película se comienza a comportar muy similar en el ambiente iluminado y oscuro por lo que podemos darnos cuenta que ya no se trata de una película fotovoltaica, ya que aunque las dos curvas no están aún encimadas, la diferencia entre ellas es muy pequeña.

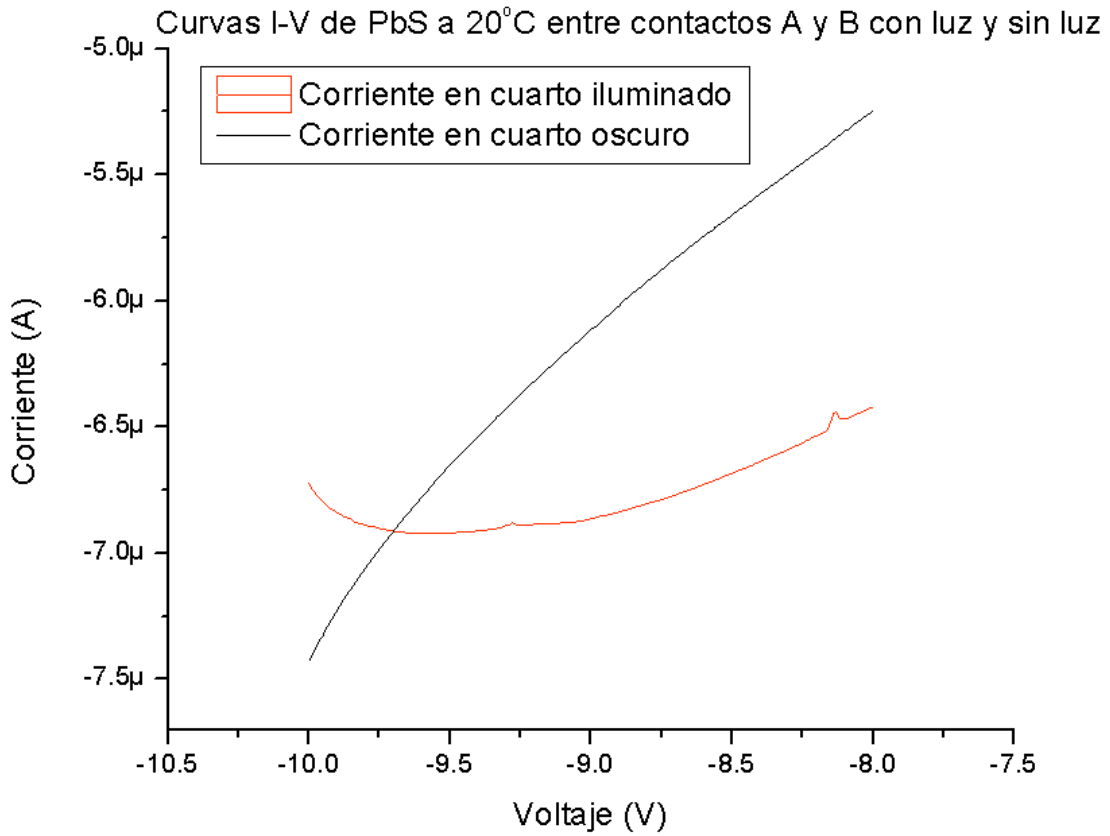


Figura 5.67 Curvas de $I-V$ para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 20°C por 3.5 horas, medidas en los contactos A-B sin luz en negro y con luz en rojo.

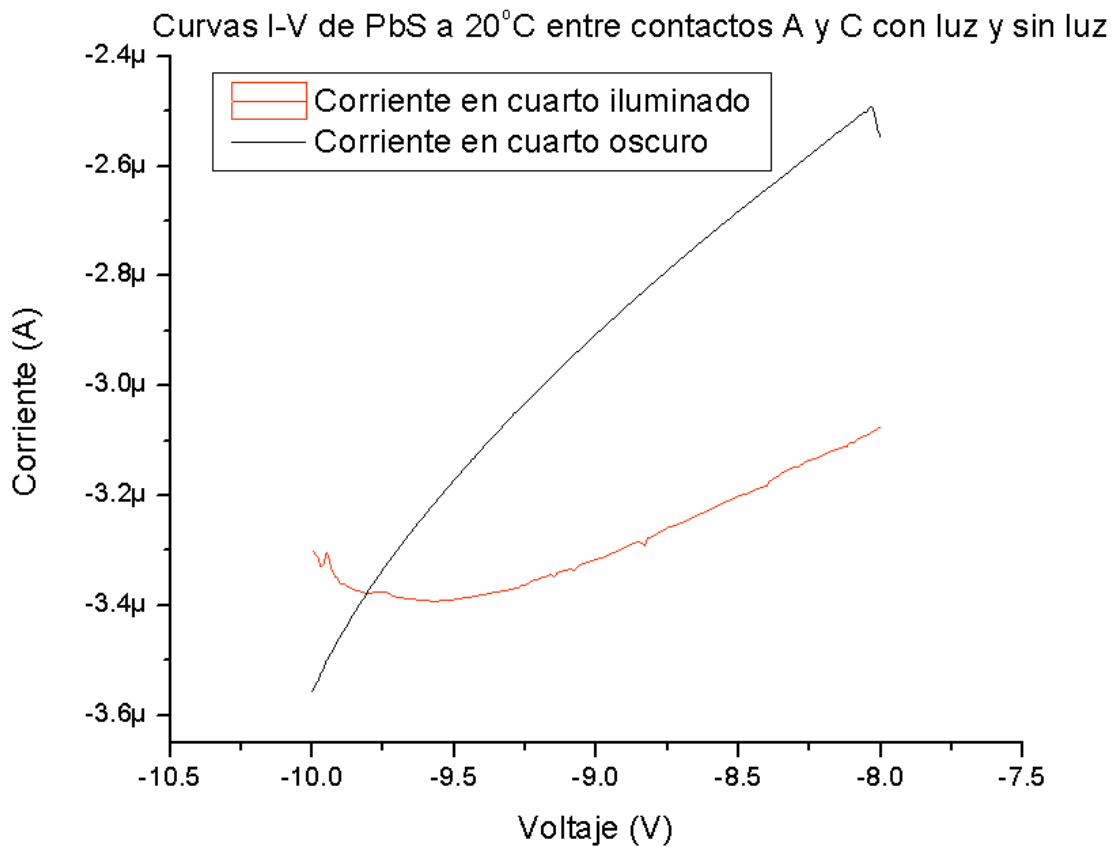


Figura 5.68 Curvas de $I-V$ para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 20°C por 3.5 horas, medidas en los contactos A-C sin luz en negro y con luz en rojo.

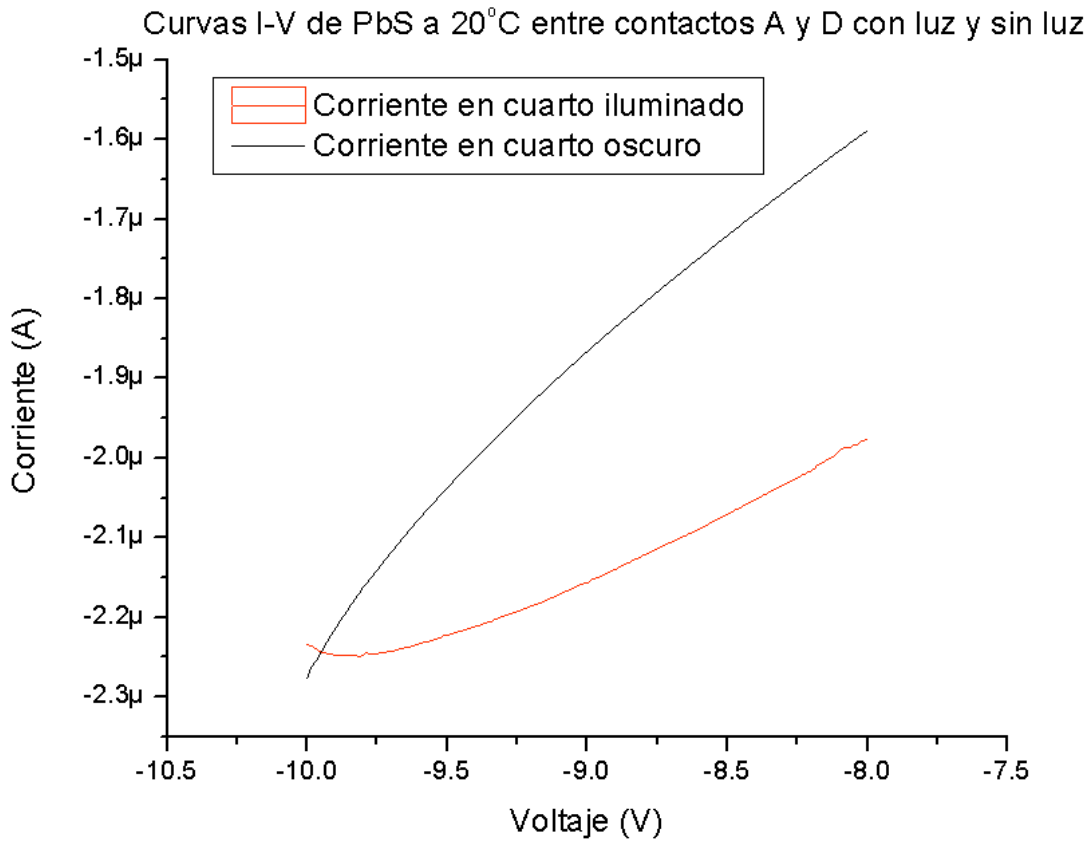


Figura 5.69 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 20°C por 3.5 horas, medidas en los contactos A-D sin luz en negro y con luz en rojo.

De la figura 5.70, a la 5.84 observamos resultados para cada una de las películas depositada de 30°C a 70 °C, donde las curvas que representan la corriente a oscuridad total y las que representan la corriente en un cuarto iluminado se comportan de manera casi igual una de la otra dejando claro que cuando las películas se depositas a más de 30°C la iluminación del cuarto donde se caracterizan eléctricamente no influye en lo absoluto.

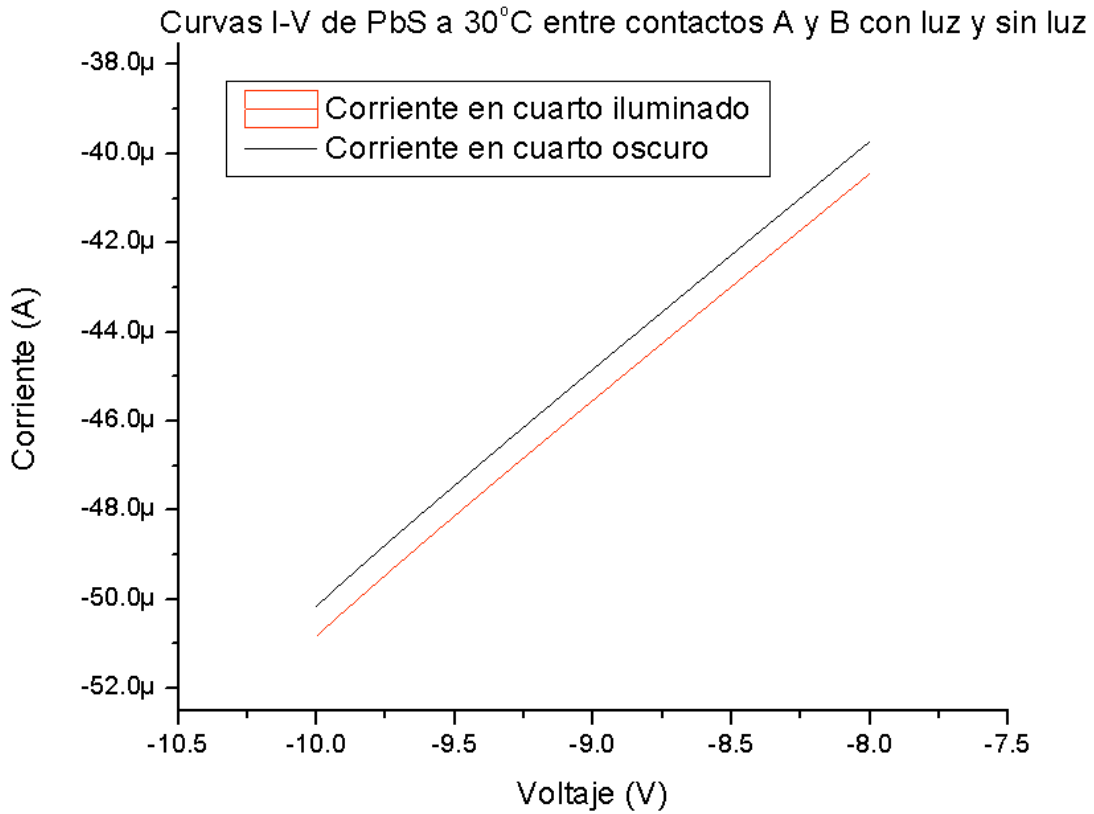


Figura 5.70 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 30°C por 3 horas, medidas en los contactos A-B sin luz en negro y con luz en rojo.

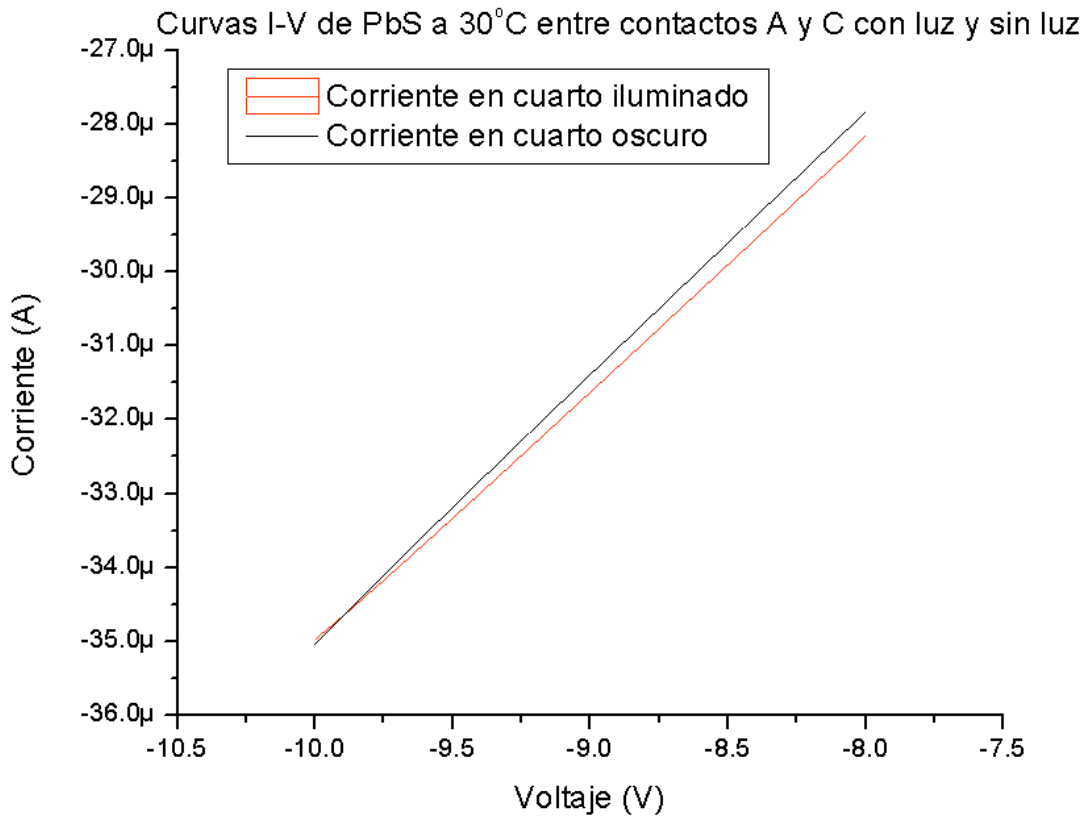


Figura 5.71 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 30°C por 3 horas, medidas en los contactos A-C sin luz en negro y con luz en rojo.

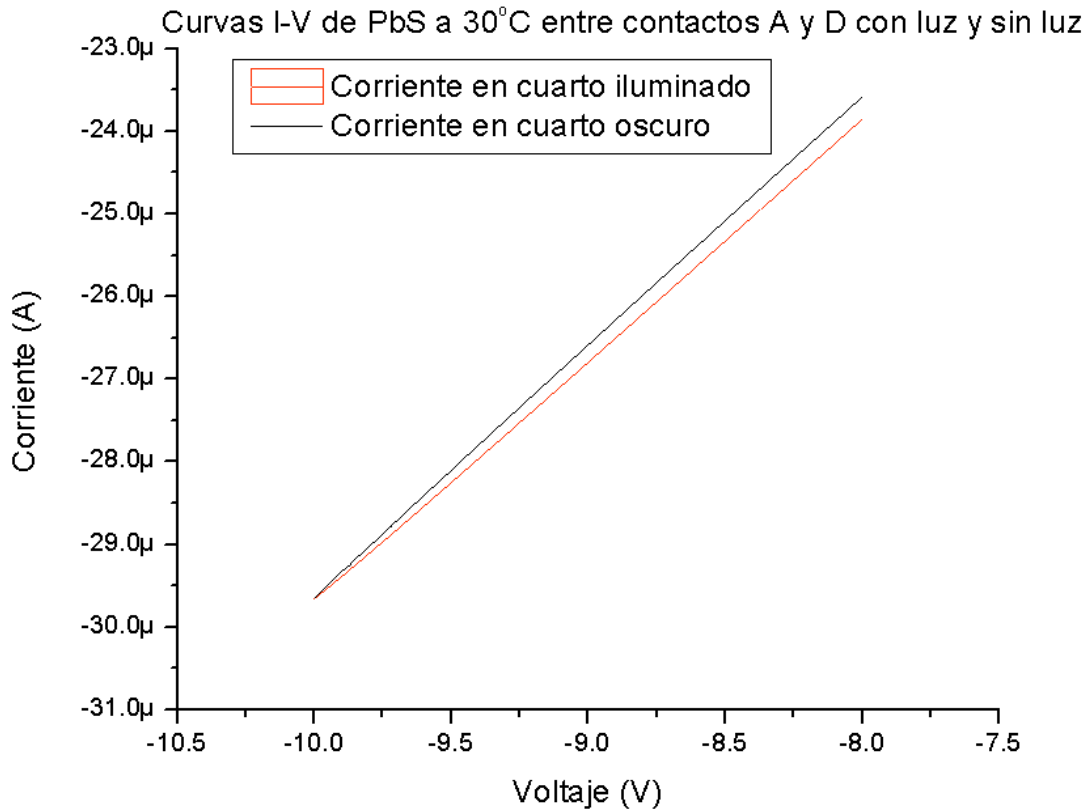


Figura 5.72 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 30°C por 3 horas, medidas en los contactos A-D sin luz en negro y con luz en rojo.

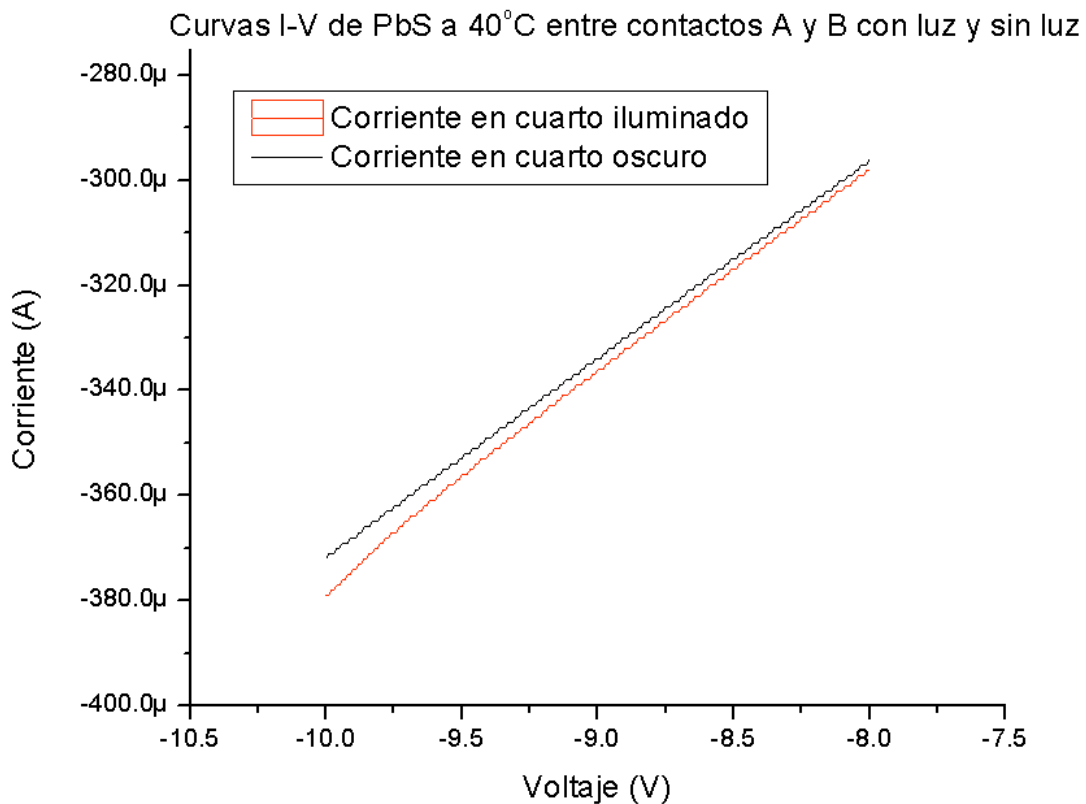


Figura 5.73 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 40°C por 3 horas, medidas en los contactos A-B sin luz en negro y con luz en rojo.

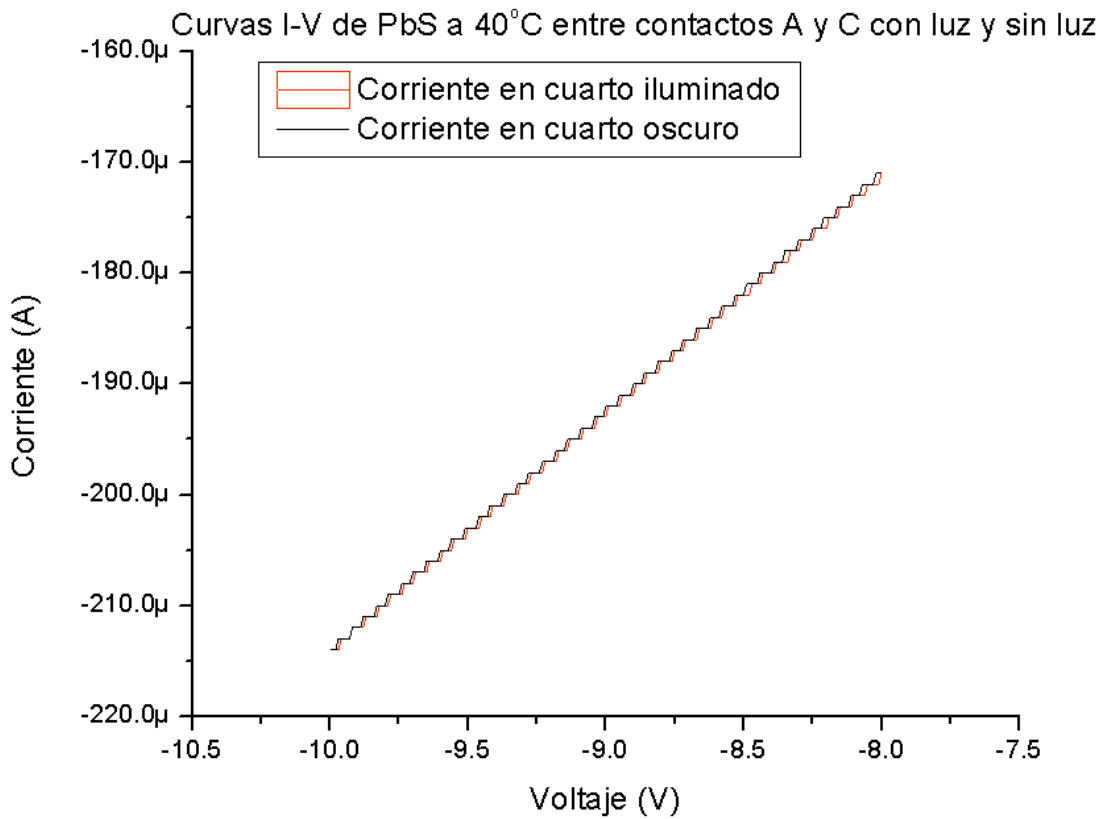


Figura 5.74 Curvas de $I-V$ para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 40°C por 3 horas, medidas en los contactos A-C sin luz en negro y con luz en rojo.

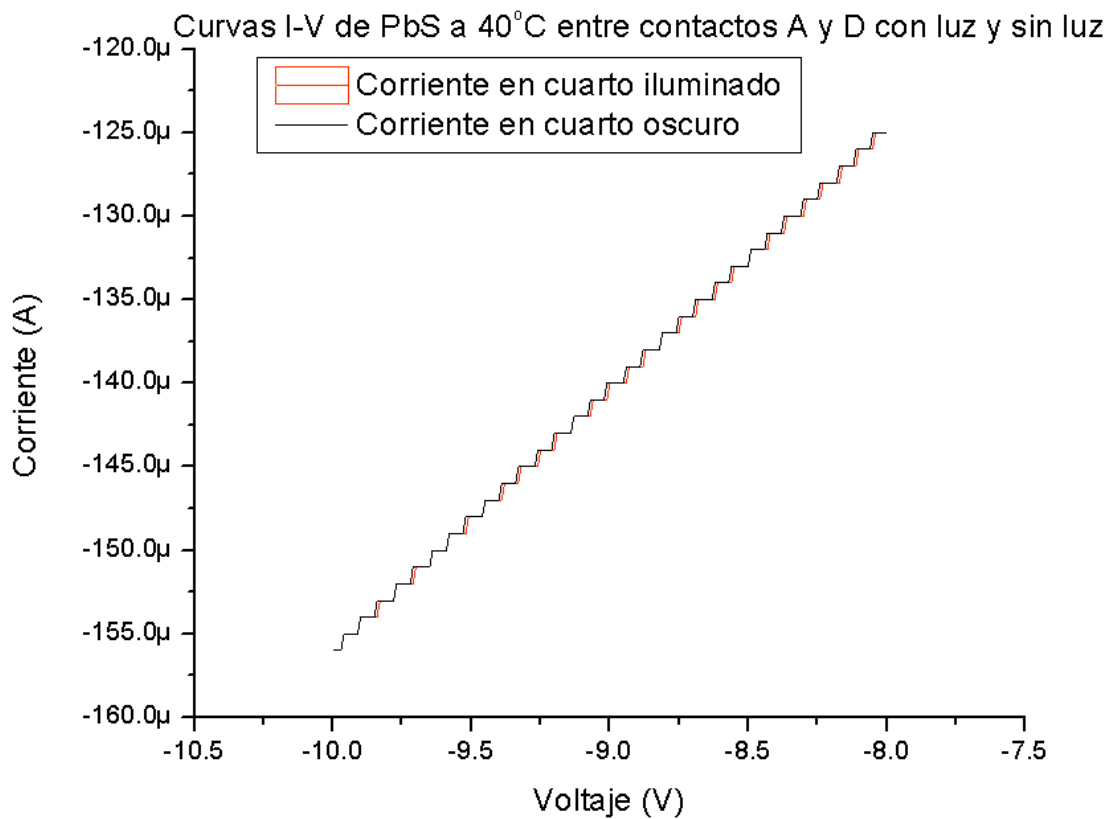


Figura 5.75 Curvas de $I-V$ para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 40°C por 3 horas, medidas en los contactos A-D sin luz en negro y con luz en rojo.

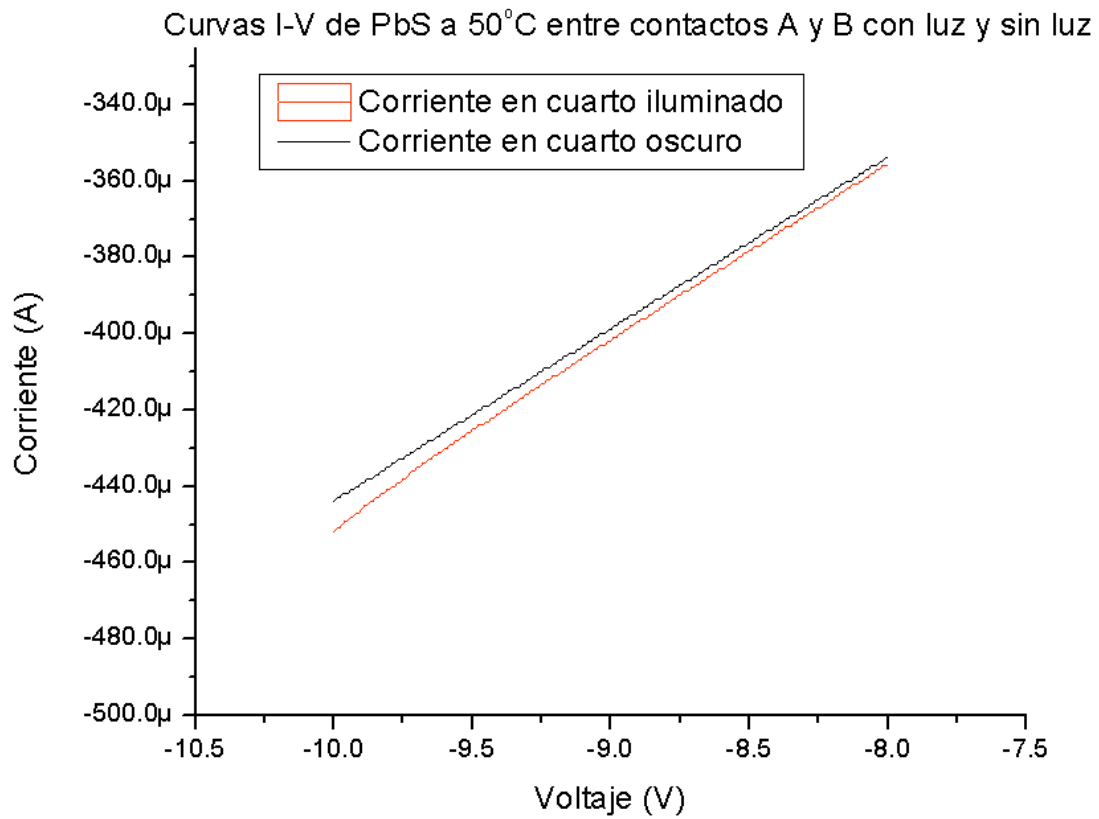


Figura 5.76 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 50°C por 2 horas, medidas en los contactos A-B sin luz en negro y con luz en rojo.

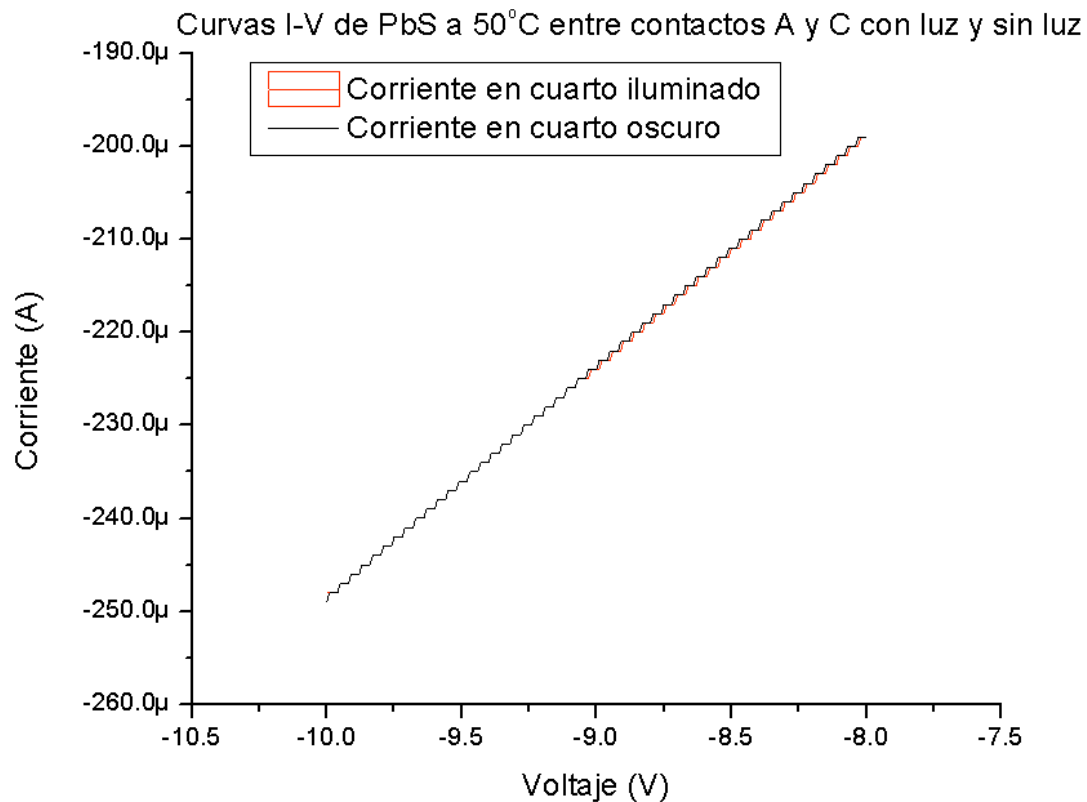


Figura 5.77 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 50°C por 2 horas, medidas en los contactos A-C sin luz en negro y con luz en rojo.

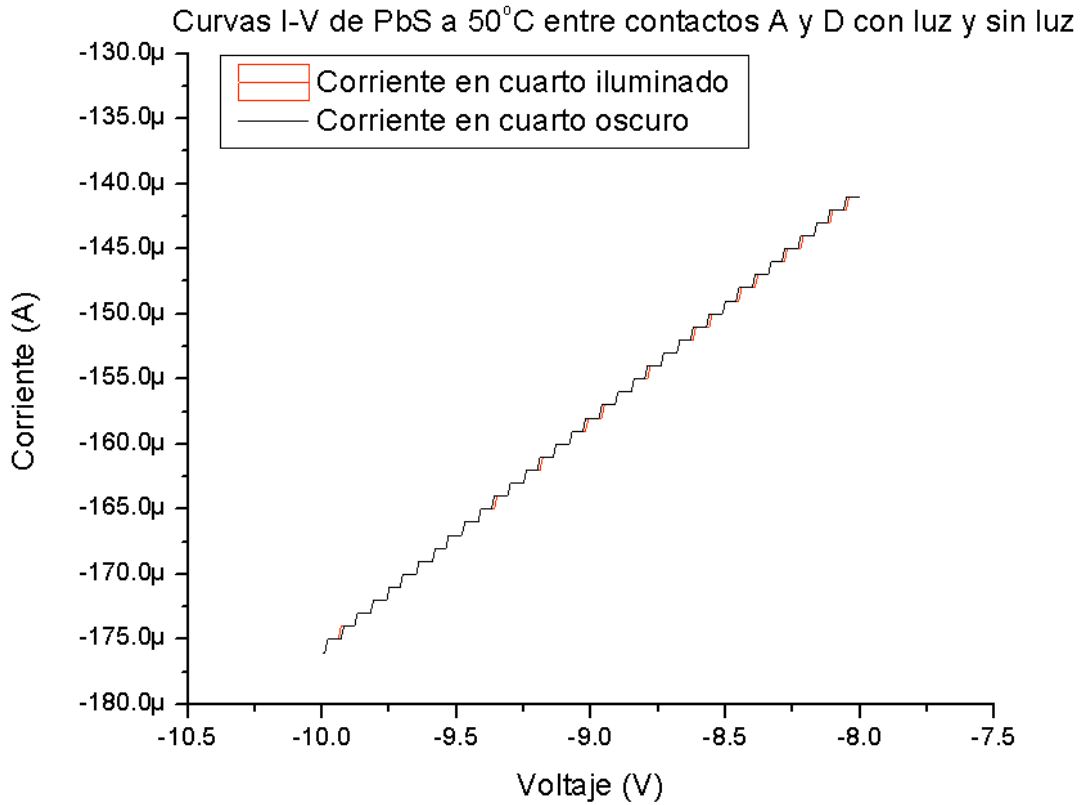


Figura 5.78 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 50°C por 2 horas, medidas en los contactos A-D sin luz en negro y con luz en rojo.

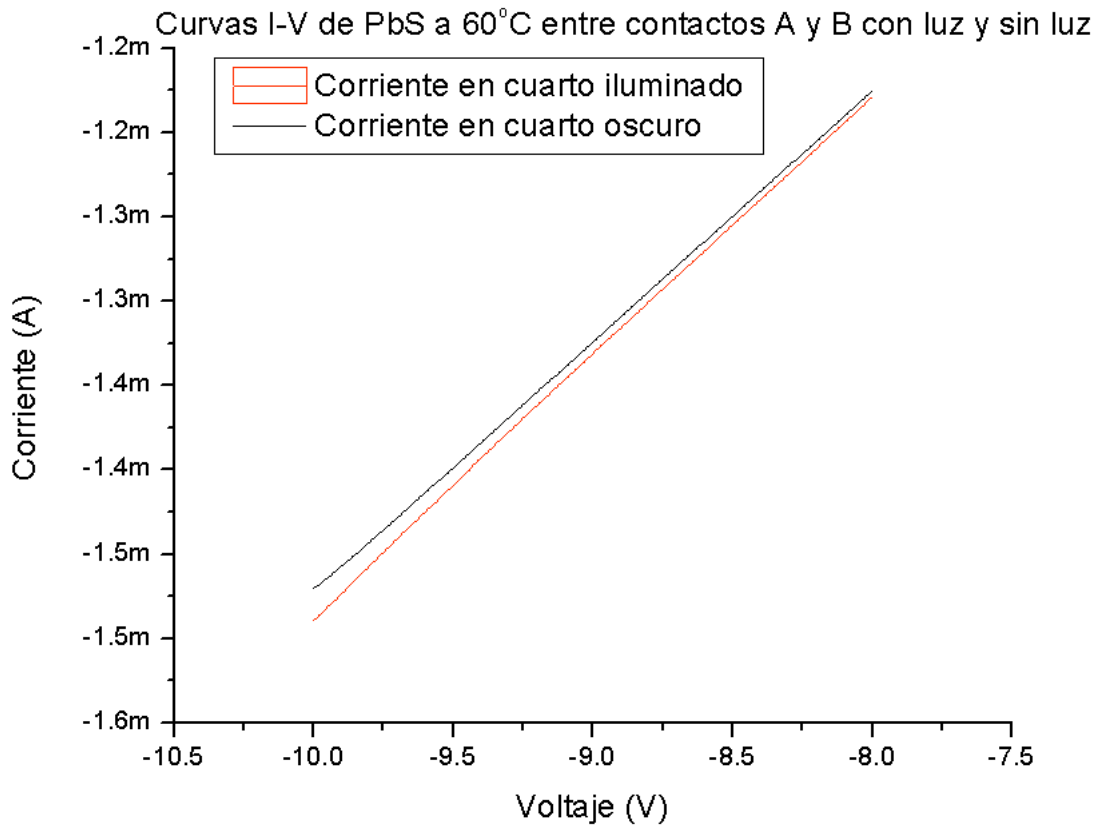


Figura 5.79 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 60°C por 2 horas, medidas en los contactos A-B sin luz en negro y con luz en rojo.

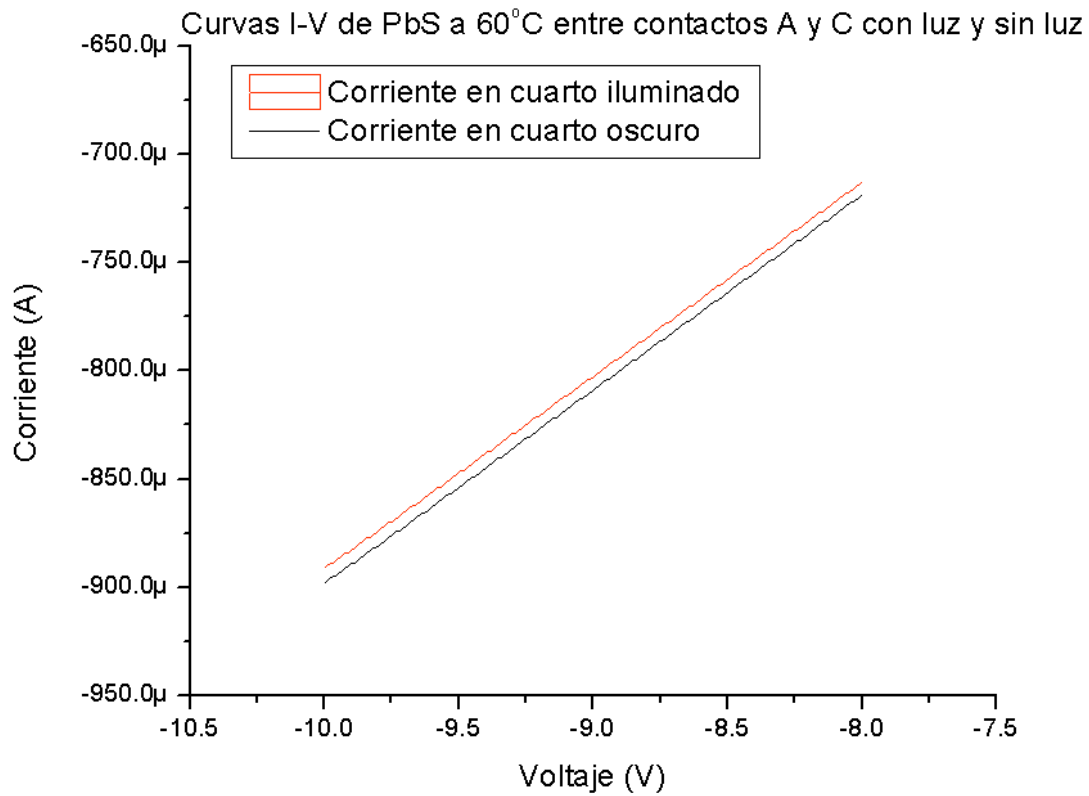


Figura 5.80 Curvas de $I-V$ para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 60°C por 2 horas, medidas en los contactos A-C sin luz en negro y con luz en rojo.

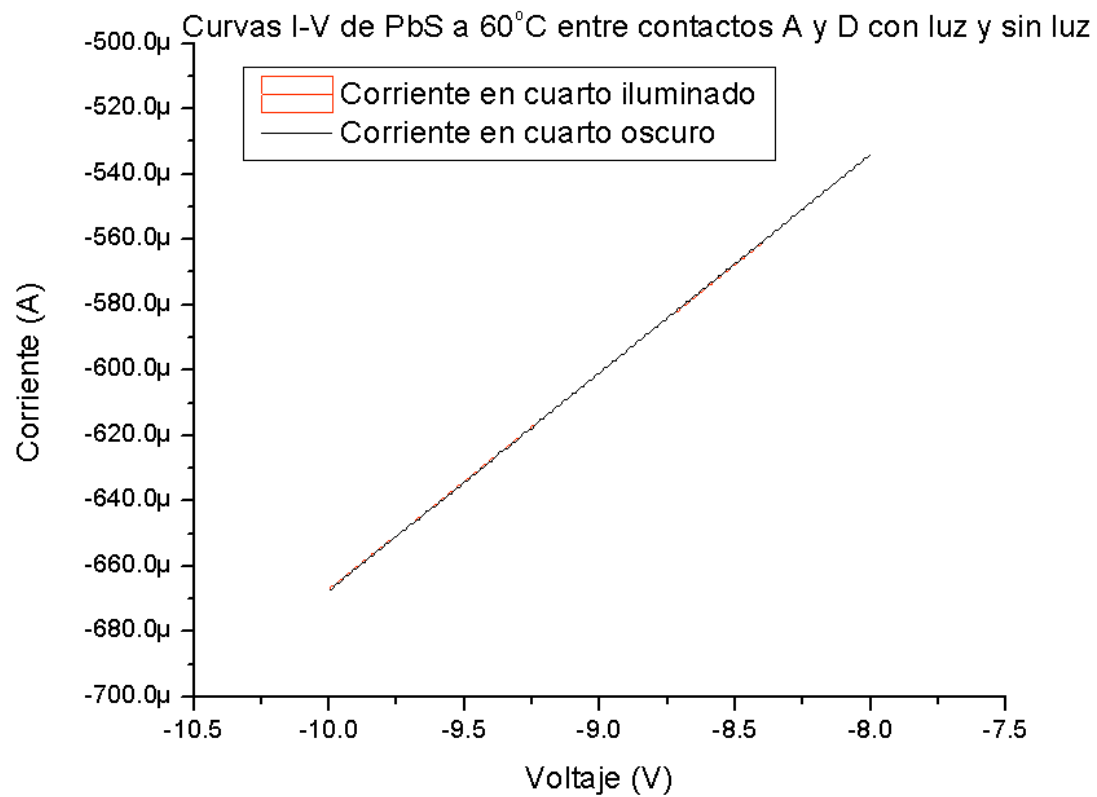


Figura 5.81 Curvas de $I-V$ para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 60°C por 2 horas, medidas en los contactos A-D sin luz en negro y con luz en rojo.

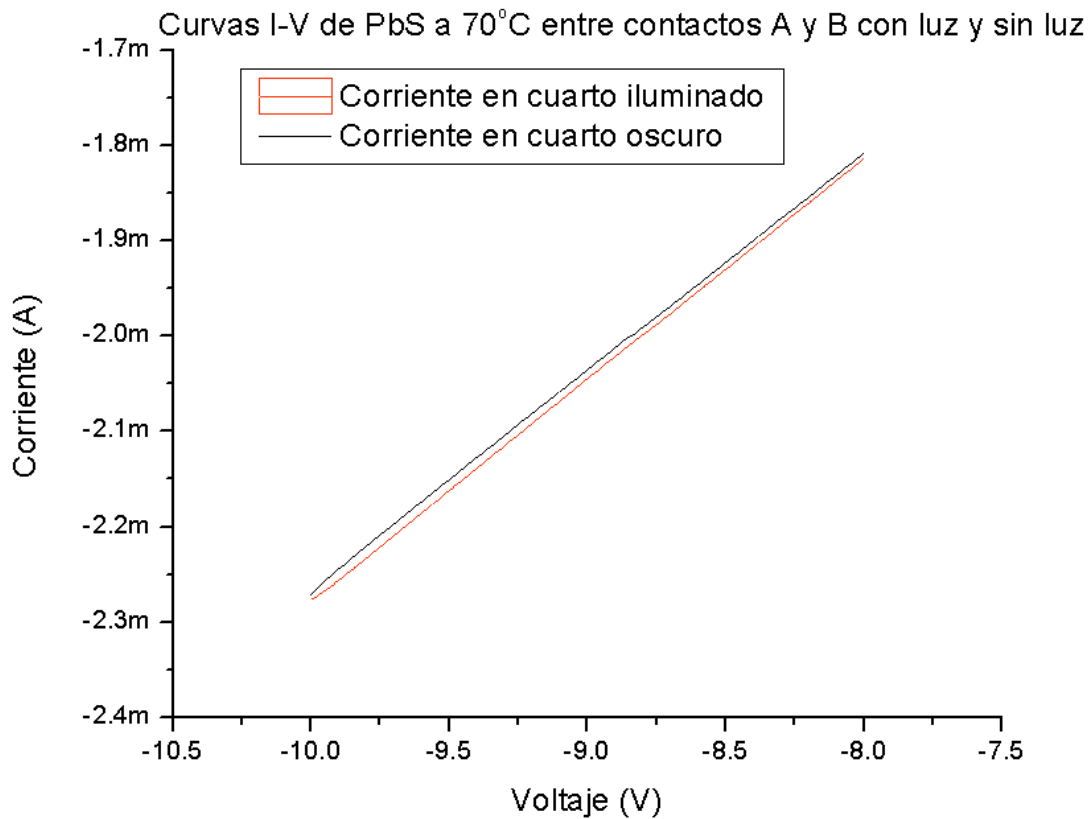


Figura 5.82 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 70°C por 2 horas, medidas en los contactos A-B sin luz en negro y con luz en rojo.

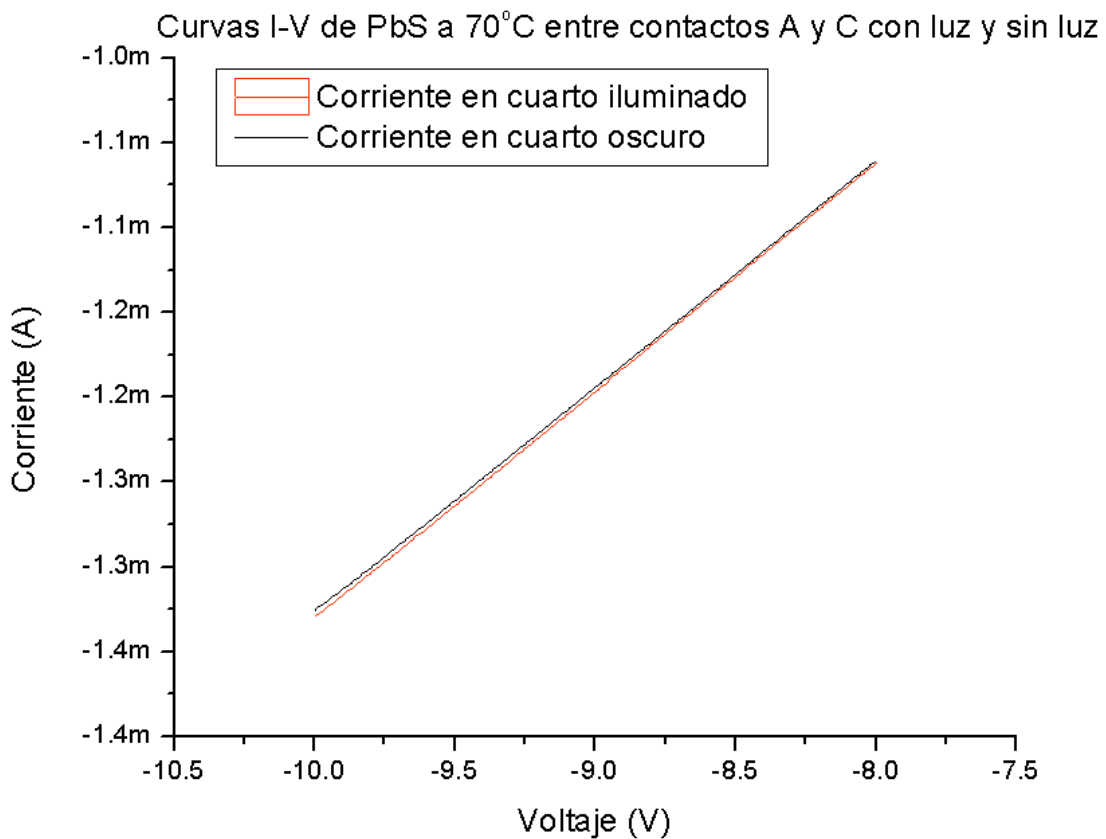


Figura 5.83 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 70°C por 2 horas, medidas en los contactos A-C sin luz en negro y con luz en rojo.

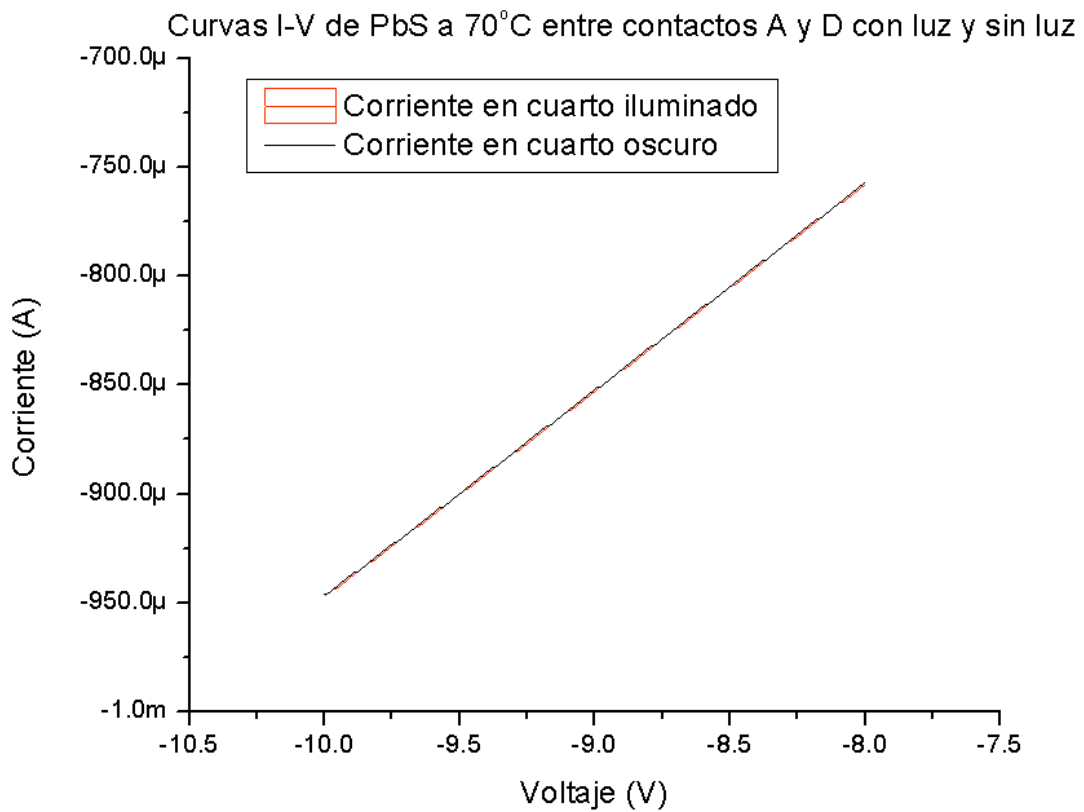


Figura 5.84 Curvas de I - V para película delgada de sulfuro de plomo depositada a 70°C por 2 horas, medidas en los contactos A-D sin luz en negro y con luz en rojo.

5.6 Análisis de velocidad de respuesta del material

Se elaboró un estudio de la velocidad de respuesta de nuestro material mediante la inyección de un pulso de voltaje a 1K Hz como el que se muestra en la figura 5.88 entre las terminales A y D de 4 películas delgadas de sulfuro de plomo, las cuales fueron medidas simultáneamente con un osciloscopio entre las terminales B y C para comparar la entrada con la salida y ver los cambios en la velocidad de respuesta el material mediante el aumento de la temperatura de depósito.

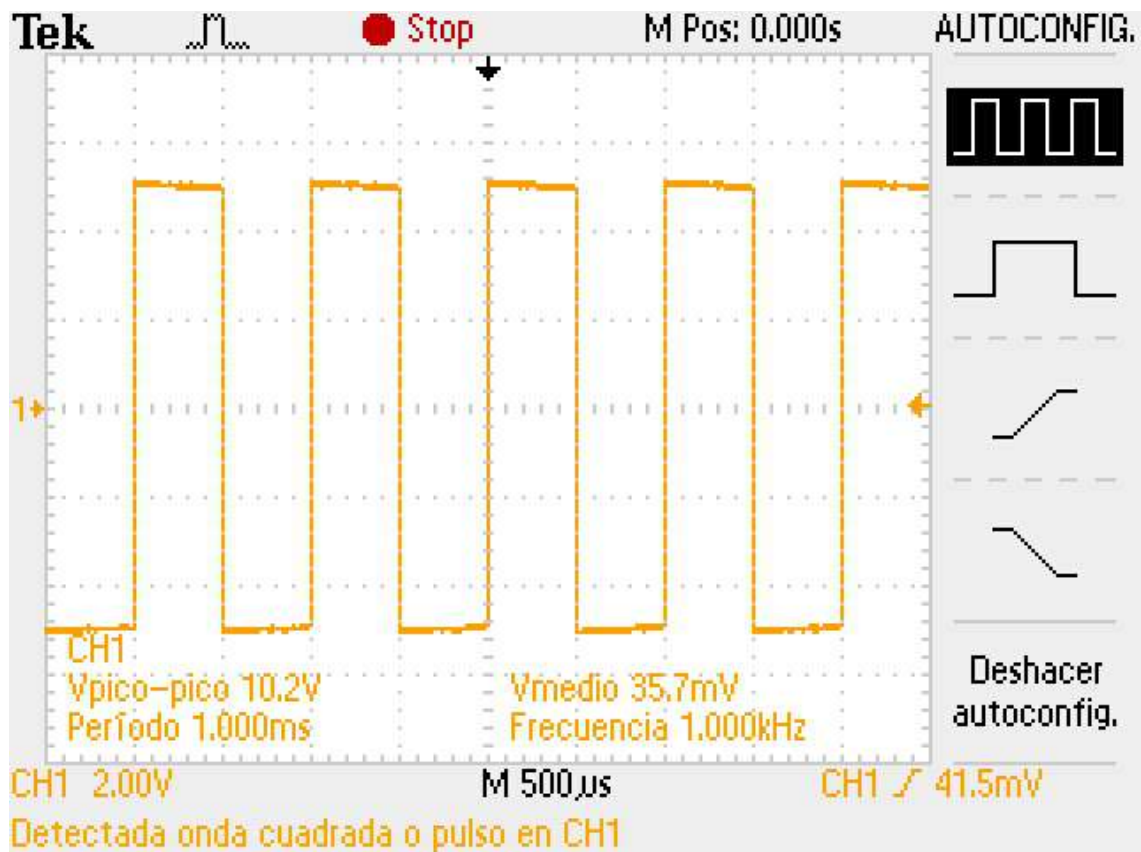


Figura 5.85 Voltaje pulsado inyectado entre las terminales A y D de cada una de las cuatro películas de PbS.

Las películas medidas fueron la depositada a 10°C durante 5 horas, la depositada a 30°C durante 3 horas, la depositada a 50°C durante 2 horas y la depositada a 70°C por 1 hora. Las cuales se muestran en las figuras 5.89, 5.90, 5.91 y 5.92 respectivamente.

Las películas se seleccionaron de tal forma para tener una idea del comportamiento mediante el aumento en la temperatura, pero utilizando cada vez tiempos menores para que el grosor de la película fuera casi el mismo para cada una de ellas.

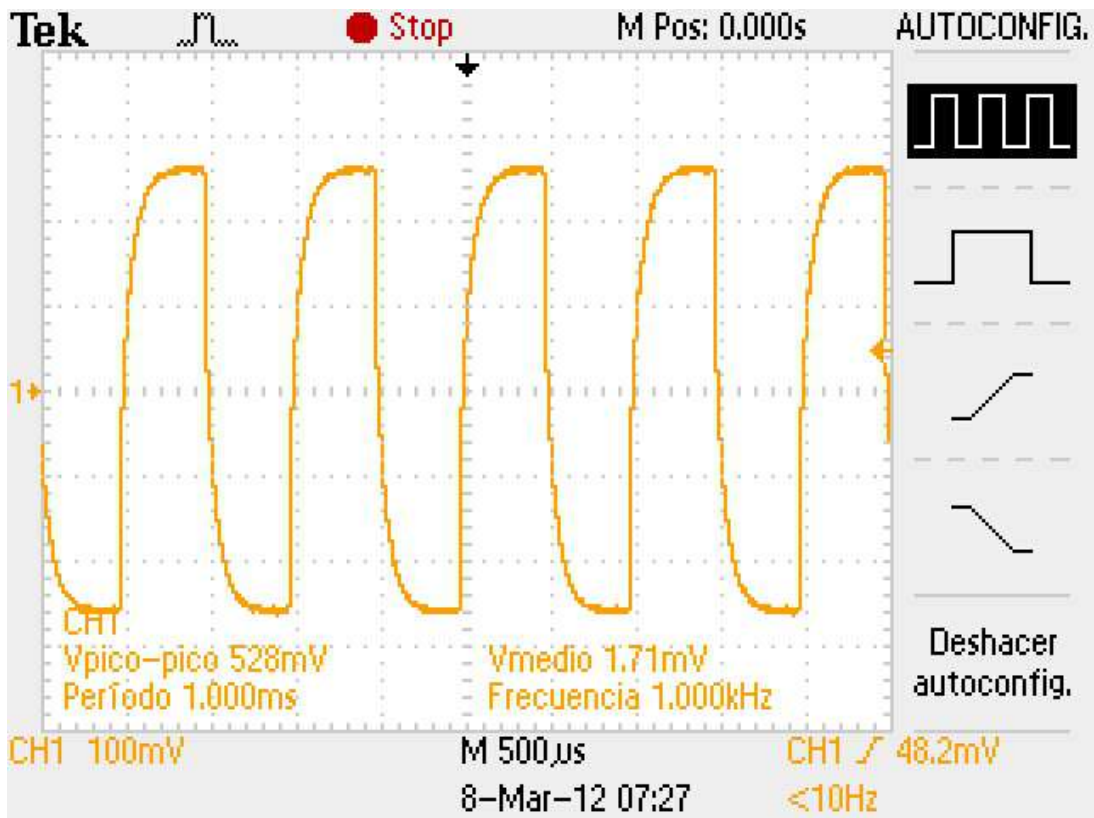


Figura 5.86 Voltaje pulsado de salida entre terminales B y C de la película de PbS depositada a 10°C durante 5 horas.

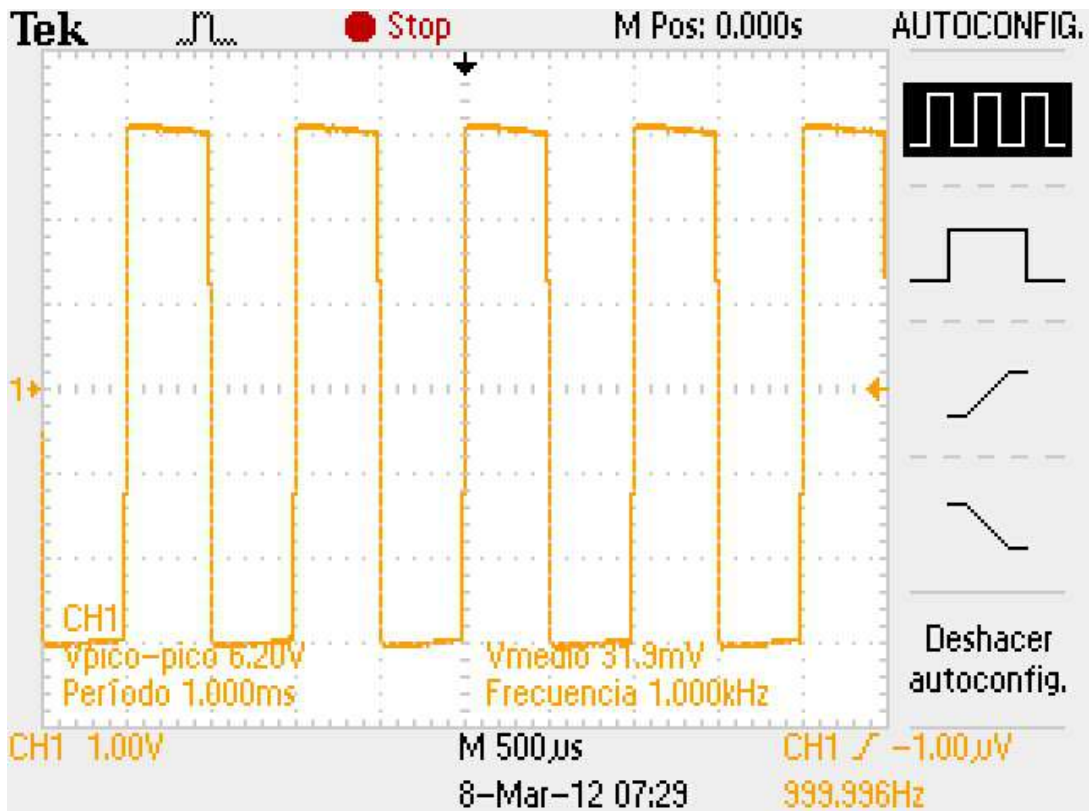


Figura 5.97 Voltaje pulsado de salida entre terminales B y C de la película de PbS depositada a 30°C durante 3 horas.

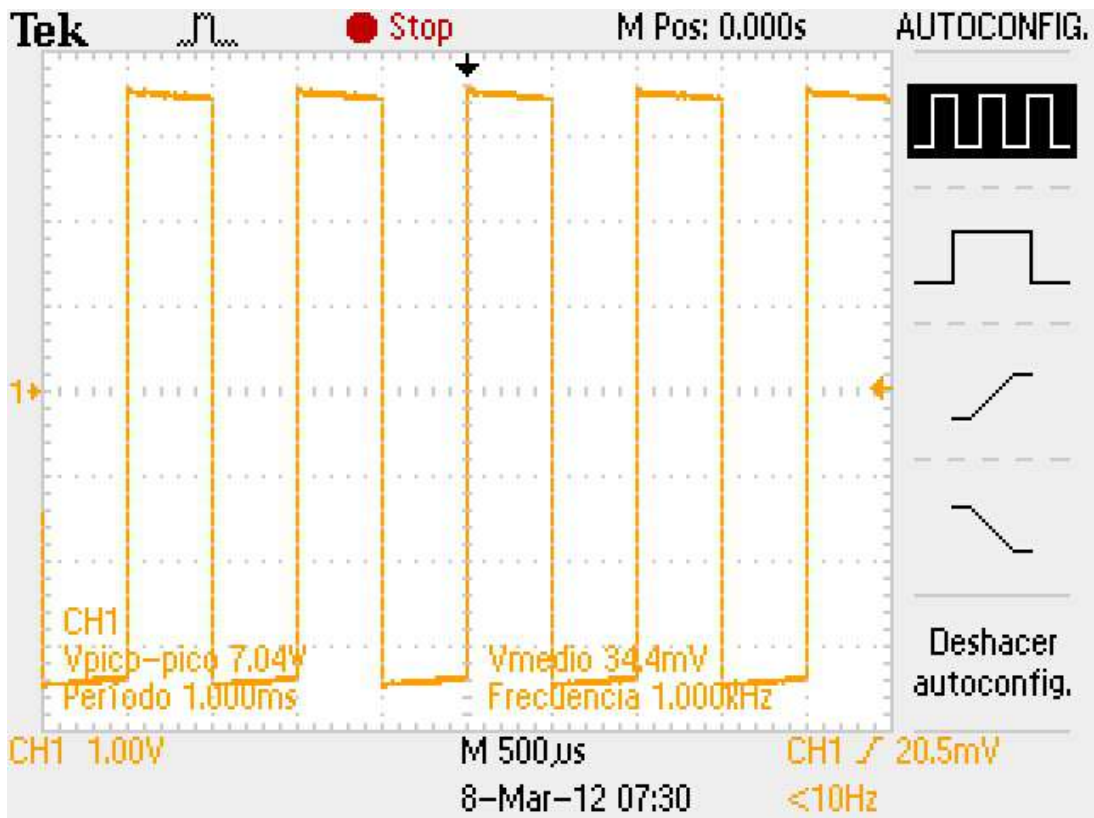


Figura 5.988 Voltaje pulsado de salida entre terminales B y C de la película de PbS depositada a 50°C durante 2 horas.

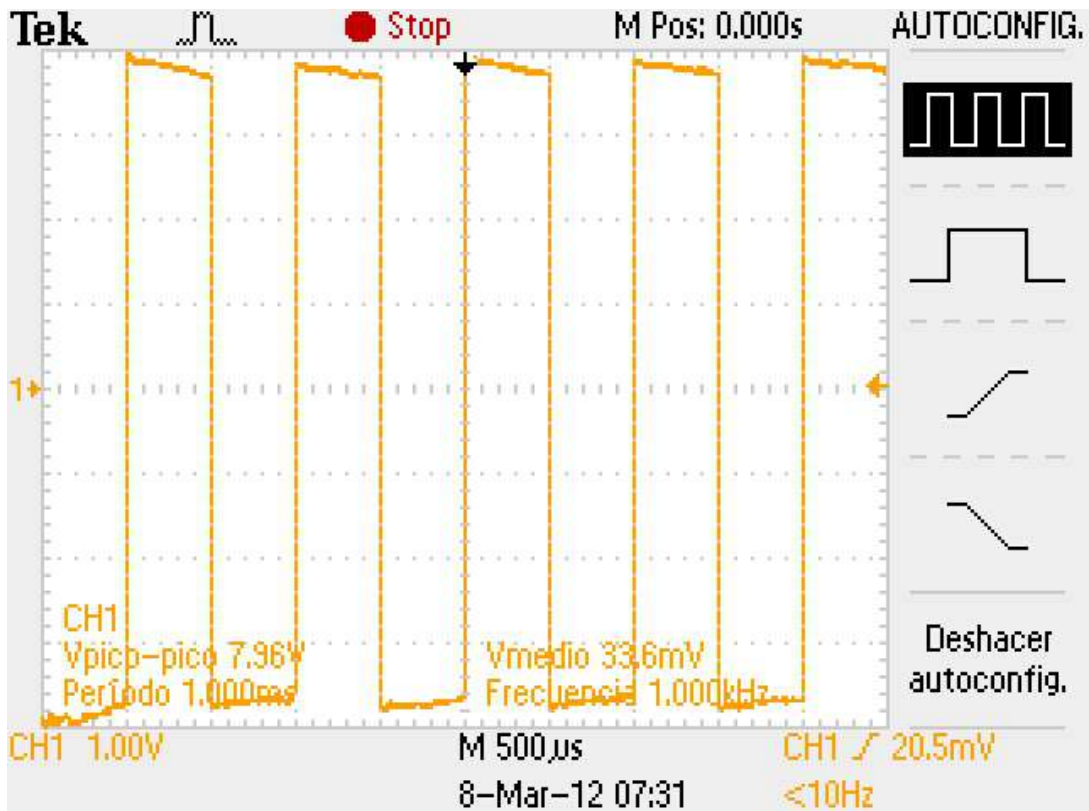


Figura 5.89 Voltaje pulsado de salida entre terminales B y C de la película de PbS depositada a 70°C durante 1 hora.

De la información mostrada en las imágenes anteriores es posible deducir que mientras aumentamos la temperatura de depósito del material, este obtiene una mejor velocidad de respuesta. Lo anterior es posible verlo al comparar como en la figura 5.89 el pulso tiene un retardo de alrededor de $250\mu s$ con respecto al pulso de entrada y en cuanto a las otras tres imágenes, el pulso de salida se da casi al mismo tiempo que en la entrada.

Capítulo 6

Conclusiones y perspectivas

Se desarrollaron una serie de películas delgadas de sulfuro de plomo por el método de baño químico a diferentes temperaturas y tiempos, las cuales fueron caracterizadas eléctricamente mediante el estudio de corriente contra voltaje, el cual nos permitió identificar que de tres diferentes materiales de contactos estudiados, como lo fueron el cromo, aluminio y grafito. Este último fue el identificado como mejor contacto de los tres estudiados, por su mejor respuesta eléctrica mostrada en los estudios realizados.

Por medio del estudio de $I-V$ aparte de identificar el mejor contacto, fue posible conocer la influencia de la temperatura y tiempo de depósito sobre el grosor de las películas, la cual notamos que mientras estos parámetros aumentan, la película obtiene un mayor grosor.

La resistividad y conductividad de las películas también fue posible encontrar como eran influenciadas por la temperatura y tiempo de depósito, ya que al ser películas depositadas a más temperaturas éstas se comportan mucho más conductoras, siendo notorio su cambio en 4 ordenes de magnitud en la resistividad del material al cambiar la temperatura de depósito de 10 a 70°C. Este comportamiento era el esperado debido a que al aumentar la temperatura de depósito el material se deposita de una forma más compacta lo cual facilita el flujo de electrones, haciendo esta una película más conductora.

En la última parte de la investigación se logró conocer la influencia de la iluminación del ambiente en el que se hacen las mediciones $I-V$ sobre la conductividad del material, dejando ver que con películas depositadas a menos de 30°C el material se comporta menos conductor en la oscuridad que en un ambiente totalmente iluminado, esto es posible verlo muy claramente en la gráfica de la película depositada a 10°C en la cual se notó un cambio de hasta cuatro veces en la conductividad de las mismas. Pero este comportamiento cambia a partir de los 30°C en el depósito de las películas, ya que a partir de ahí, la conductividad del material no depende de la iluminación del ambiente en que se mide. Lo cual nos indica que dependiendo el tipo de dispositivo que se desea crear es posible seleccionar la temperatura de depósito adecuada para que la película cumpla con las características requeridas.

Los parámetros eléctricos de un material, son muy importantes para el diseño de un dispositivo electrónico con películas delgadas como transistores donde se busca utilizar una película más resistiva, a diferencia de una fotocelda donde las características buscadas corresponden a una película delgada más conductora.

Sería conveniente como continuación a este trabajo en un futuro, utilizar diferentes materiales como contactos en unión con el sulfuro de plomo, estos podrían ser plata, oro, estaño entre otros y el análisis transitorio completo para encontrar la respuesta del material. Así como la unión con otros semiconductores para formar estructuras que nos permitan desarrollar dispositivos.

Bibliografía

- [1] Gary Hodes, Chemical solution deposition of semiconductor films, Marcel Dekker, Inc, USA, 2003, Weizmann Institute of Science Rehovot, Israel.
- [2] J Sánchez-Barricarte, Disposición de capas constituyentes de estructuras multicapa con funciones controlables eléctricamente, Trabajo académico curso 2005/2006 Depto. De Física Aplicada, Universidad de Zaragoza.
- [3] J. Valenzuela, Estudio de películas de PbS depositadas por baño químico, CINVESTAV Querétaro, México 2000.
- [4] J. Valenzuela-Jauregui, R Ramírez-Bon, Optical properties of PbS thin films chemically deposited at different temperatures, CINVESTAV Querétaro, México 2000.
- [5] Ma. Teresa Ramirez-Palma, Rafael Huirache-Acuña, Estado del arte del proceso sol-gel en México, Ciencia Ergo Sum, Vol. 17, Num. 2, julio-octubre, 2010 pp. 183-188, Instituto de investigaciones en materiales, UNAM
- [6] C. Gómez-Aleixandre, J.M Albella, Síntesis de materiales cerámicos mediante técnicas químicas en fase vapor (CVD), Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio, 42 (1) 27-31 (2003), Instituto Ciencia de Materiales, CSIC, Madrid.
- [7] N. Choudhury, B.K. Sarma, Structural analysis of chemically deposited nanocrystalline PbS films, Thin Solid Films 519 (2011) 2132-2134.
- [8] M.M. Abbas, Ab-M. Shehab, Effect of temperature and deposition time on the optical properties of chemically deposited nanostructure PbS thin films, Thin Solid Films 519(2011) 4917-4922.
- [9] A. Aghassi, M. Jafarian, AC impedance and cyclic voltammetry studies on PbS semiconducting film prepared by electrodeposition, Journal of Electroanalytical Chemistry 661 (2011) 265-269.
- [10] F.A. Fenández-Lima, Y. González-Alfaro, Structural characterization of chemically deposited PbS thin films, Material Science and Engineering B 136 (2007) 187-192.
- [11] Sang Hyunk Im, Hi-Jung Kim, Near-infrared responsive PbS-sensitized photovoltaic photodetectors fabricated by the spin-assisted successive ionic layer adsorption and reaction method, Nanotechnology 22 (2011) 395502 (5pp), Korean research institute of chemical technology.

- [12] Harumi Moreno García, All-chemically deposited $\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{PbS}$ solar cells, *Thin Solid Films* 519 (2011) 2287-2295, Centro de investigación en energía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [13] A. Osherov, M. Shandalov, EPITXY and orientation control in chemical solution deposited PbS and PbSe monocrystalline films, *Journal of Crystal Growth* 308 (2007) 334-339, Department of materials engineering and the Ilse Kats center for nanoscience and nanotechnology.
- [14] A. Osherov, V. Ezersky, The role of solution composition in chemical bath deposition of epitaxial thin films of PbS on GaAs(1 0 0), *Journal of Crystal Growth* 304 (2007) 169-178, Department of materials engineering and the Ilse Kats center for nanoscience and nanotechnology.
- [15] E. Pentia, L. Pintilie, Bi influence on growth and physical properties of chemical deposited PbS films, *Thin Solid Films* 434 (2003) 162-170, National institute of materials physics, Romania.
- [16] Syed B. Qadri, Alok Singh, Structural stability of PbS films as a function of temperature, *Thin Solid Films* 431-432 (2003) 506-510, US Naval research laboratory, Washington DC, USA.
- [17] A. A. Rempel, N. S. Kozhevnikova, Towards particle size regulation of chemically deposited lead sulfide (PbS), *Journal of Crystal Growth* 280 (2005) 300-308, SCK-CEN Belgium.
- [18] E. I. Rogacheva, O. N. Nashchekina, Effect of thickness on the thermoelectric properties of PbS thin films, *Thin Solid Films* 423 (2003) 115-118, National technical university, Ukraine.
- [19] S. I. Sadovnikov, N. S. Kozhevnikova, The structure and optical properties of nanocrystalline lead sulfide films, ISSN 1063-7826, *Semiconductors*, 2011, Vol. 45, No. 12, pp. 1559-1570, Institute of solid-state chemistry, Yakaterinburg Russia.
- [20] S. I. Sadovnikov, N. S. Kozhevnikova, Optical properties of nanostructured lead sulfide films with a DO_3 cubic structure, *Thin Solid Films* 516 (2008) 6048-6051, Institute of solid-state chemistry, Yakaterinburg Russia.
- [21] Yu Jun Yang, Shengshui Hu, The deposition of highly uniform and adhesive nanocrystalline PbS film from solution, College of chemistry & molecular sciences, Wuhan University, China.
- [22] I.E. Morales, M.A. Quevedo, R Ramírez Bon, Electrical behavior of p-type PbS-based metal-oxide-semiconductor thin film transistors, *Thin Solid Films* 519 (2010) 512-516.
- [23] J. Hernández Borja, R. Ramírez Bon, Thin film solar cells of CdS/PbS chemically deposited by an ammonia-free process, *Solar Energy Materials & Solar Cells* (2011) 1882-1888.