

TESIS DEFENDIDA POR
Pedro Casillas Figueroa
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Roberto Machorro Mejía
Director del Comité

M. C. Moisés Castro Delgado
Codirector del Comité

Dr. Luis Alejandro Márquez Martínez
Miembro del Comité

M. C. Ricardo Francisco Núñez Pérez
Miembro del Comité

Dr. Julio Sheinbaum Pardo
Miembro del Comité

Dr. Roberto Conte Galván
*Coordinador del programa de
posgrado en Electrónica y
Telecomunicaciones*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

4 de octubre de 2010.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**ELIPSÓMETRO PARA EL ANÁLISIS *IN-SITU* DE DEPÓSITOS DE PELÍCULAS
DELGADAS**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

PEDRO CASILLAS FIGUEROA

Ensenada, Baja California, México, octubre de 2010.

RESUMEN de la tesis de **Pedro Casillas Figueroa**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Instrumentación y Control. Ensenada, Baja California. Octubre de 2010.

ELIPSÓMETRO PARA EL ANÁLISIS *IN-SITU* DE DEPÓSITOS DE PELÍCULAS DELGADAS

Resumen aprobado por:

Dr. Roberto Machorro Mejía

Director del Comité

M. C. Moisés Castro Delgado

Codirector del Comité

Se desarrolló un elipsómetro fotométrico y espectroscópico de analizador rotatorio para el análisis in-situ y la caracterización de las propiedades ópticas y físicas de películas delgadas. Este proyecto se emprendió con el objetivo de ofrecer una alternativa versátil a los elipsómetros comerciales, los cuales tienen un alto costo, además de que no permiten hacer modificaciones o adaptaciones de acuerdo a las necesidades particulares del usuario.

Este instrumento se construyó con una estructura modular en la cual sus componentes no están dedicados ni fueron adquiridos exclusivamente para esta aplicación, sino que se emplean elementos comerciales de uso general dentro de las actividades de un laboratorio de óptica. Como resultado, se obtuvo un instrumento flexible y relativamente barato capaz de extraer información suficiente en el intervalo de longitudes de onda de 370—820 nm para estudiar propiedades ópticas y físicas de superficies y de películas delgadas.

Palabras Clave: Elipsometría in-situ, elipsómetro fotométrico, analizador rotatorio, análisis espectroscópico, películas delgadas, propiedades ópticas.

ABSTRACT of the thesis presented by **Pedro Casillas Figueroa** as a partial requirement to obtain the **MASTER OF SCIENCE** degree in **Electronic and Telecommunications with orientation in Instrumentation and Control**. Ensenada, Baja California, Mexico. October 2010.

ELLIPSOMETER FOR *IN-SITU* ANALYSIS OF THIN FILM DEPOSITION

A photometric spectroscopic rotating analyzer ellipsometer was developed for in-situ analysis and characterization of the optical and physical properties of thin films. The goal of this project is to offer a versatile alternative to commercial ellipsometers, which are very expensive and does not allow any modifications according to user's particular needs.

This instrument was built in a modular structure where its components are not exclusively dedicated and were not exclusively bought for this application, but they are commercial elements commonly used in an optics laboratory. As a result we have a flexible and relatively economic instrument capable for extracting enough information in the wavelength range of 370—820 nm to study optical properties of surfaces and thin films.

Keywords: In-situ ellipsometry, photometric ellipsometer, rotating analyzer, spectroscopic analysis, thin films, optical properties.

Dedicatorias

A Sandra, mi esposa.

A Lourdes, mi madre.

A mis hermanos Raúl y Mariela.

A mi sobrino David.

A Adrián y Fabián, la alegría de la familia.

Agradecimientos

A mis directores de tesis Dr. Roberto Machorro Mejía y M. C. Moisés Castro Delgado y comité de tesis M. C. Ricardo F. Núñez Pérez, Dr. Luis A. Márquez Martínez y Dr. Julio Sheinbaum Pardo, por su valioso apoyo y contribución a este trabajo.

Al Dr. Enrique Mitrani Abenchuchan, por su paciencia y buena disposición.

A mi esposa Sandra por su comprensión y ayuda incondicional.

Al Dr. Oscar Raymond Herrera por la oportunidad que me brindó para superarme académicamente.

A Enrique Medina y a Alejandro Tiznado por todo el trabajo y la disposición mostrada.

Al Dr. Víctor J. García Gradilla por su contribución a este trabajo.

A Juan Peralta, Margot Sainz y Jorge Palomares por el apoyo técnico.

A M. C. Dolores Sarracino por su paciencia e interés en la conclusión de esta tesis.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

Al Centro de Nanociencias y Nanotecnología—UNAM.

Al CONACyT por el apoyo económico proporcionado.

CONTENIDO

	Página
Resumen español	i
Resumen inglés	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	v
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	xii
Capítulo I. Introducción	1
<i>I.1 Planteamiento del problema</i>	<i>1</i>
<i>I.2 Antecedentes</i>	<i>2</i>
<i>I.3 Objetivos</i>	<i>3</i>
Capítulo II. Ondas electromagnéticas	4
<i>II.1 La luz</i>	<i>5</i>
<i>II.2 Luz polarizada</i>	<i>4</i>
<i>II.3 Representación matricial del estado de polarización</i>	<i>10</i>
<i>II.3.1 Vectores de Jones</i>	<i>10</i>
<i>II.3.2 Matrices de Jones</i>	<i>11</i>
<i>II.4 Irradiancia</i>	<i>13</i>
<i>II.5 Reflexión y refracción</i>	<i>13</i>
<i>II.6 Coeficientes de Fresnel</i>	<i>15</i>
<i>II.7 Coeficientes totales de reflexión</i>	<i>19</i>
Capítulo III. Fundamentos de elipsometría	22
<i>III.1 Elipsometría</i>	<i>22</i>
<i>III.2 Elipsómetro</i>	<i>22</i>
<i>III.3 Componentes básicos de un elipsómetro</i>	<i>22</i>
<i>III.3.1 Fuente de luz</i>	<i>23</i>
<i>III.3.2 Polarizador y analizador</i>	<i>23</i>
<i>III.3.3 Retardador y compensador</i>	<i>24</i>
<i>III.3.4 Detector</i>	<i>24</i>
<i>III.4 Tipos de elipsómetros</i>	<i>25</i>
<i>III.4.1 Las configuraciones más comunes</i>	<i>25</i>
<i>III.4.2 Comparación</i>	<i>29</i>
Capítulo IV. Instrumentación	31
<i>IV.1 La configuración elegida</i>	<i>31</i>
<i>IV.2 Modelo matricial del EAR</i>	<i>33</i>
<i>IV.3 Parámetros elipsométricos</i>	<i>36</i>

CONTENIDO (continuación)

	Página
<i>IV.4 El sistema de medición.....</i>	36
<i>IV.5 El procedimiento de medición.....</i>	38
<i>IV.5.1 Consideraciones para la adquisición de la señal.....</i>	38
<i>IV.5.1.1 Cálculo de la irradiancia.....</i>	38
<i>IV.5.1.2 Sincronización.....</i>	40
<i>IV.5.2 Adquisición de muestras.....</i>	42
<i>IV.5.3 Corrección por parámetros de calibración.....</i>	43
<i>IV.5.4 Cálculo de Ψ y Δ.....</i>	44
<i>IV.6 El programa de operación.....</i>	44
<i>IV.7 Monturas rotatorias del polarizador y del analizador.....</i>	47
<i>IV.8 La estación para mediciones estáticas.....</i>	48
Capítulo V. Puesta a punto del Instrumento.....	50
<i>V.1 Alineación.....</i>	50
<i>V.1.1 Alineación directa.....</i>	50
<i>V.1.2 Alineación normal.....</i>	51
<i>V.1.3 Detección de errores de alineación.....</i>	52
<i>V.2 Calibración.....</i>	53
<i>V.2.1 Los parámetros de interés.....</i>	53
<i>V.2.2 Los procedimientos de calibración.....</i>	54
Capítulo VI. Experimentos.....	58
Capítulo VII. Análisis de resultados.....	67
Capítulo VIII. Conclusión.....	72
Literatura citada.....	74
Apéndice A. Especificaciones de los componentes.....	76
Apéndice B. Diseño de circuitos electrónicos.....	82
Apéndice C. Diseño de monturas mecánicas.....	86
Apéndice D. El programa de operación.....	91

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>		Página
1	Diagrama general del sistema	3
2	Onda electromagnética	4
3	Orientación de los componentes de campo eléctrico	6
4	Vector de campo eléctrico para una polarización elíptica	6
5	Varios casos de polarización elíptica	7
6	Representación paramétrica del estado de polarización	8
7	Ejes de polarización respecto al plano de incidencia	9
8	Representación de la polarización respecto al plano de incidencia	9
9	Reflexión y refracción	15
10	Reflexión y refracción con E perpendicular al plano de incidencia	16
11	Reflexión y refracción con E paralelo al plano de incidencia	17
12	Reflexión y refracción en p y en s	18
13	Reflexión en una capa	20
14	Reflexión en multicapas	21

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
15	Espectro de la lámpara de Xenón	23
16	Algunos tipos de polarizadores	24
17	Elipsómetro monocromático tipo nulo	25
18	Elipsómetro espectroscópico de polarizador rotatorio	27
19	Elipsómetro espectroscópico de analizador rotatorio	28
20	Elipsómetro de modulación de fase	29
21	Secuencia de elementos en un elipsómetro espectroscópico PMA _{rot}	32
22	Diagrama de bloques del sistema de medición	37
23	Señales de sincronía para la adquisición de espectros	41
24	Diagrama de flujo del procedimiento de medición	46
25	Vista seccional de la montura del polarizador y del analizador	47
26	Mecanismo giratorio del polarizador y del analizador	48
27	La estación para mediciones estáticas	49
28	Detalle de los mecanismos de ajuste	49

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
29	Orientación de los componentes ópticos durante la alineación directa	51
30	Orientación de los componentes ópticos durante la alineación normal	52
31	Ejemplo de diagnóstico de la alineación de un sistema	53
32	Definición de A_s y P_s	54
33	Ajuste paramétrico de α' y β' por LM.	59
34	Ajuste paramétrico de α' y β' por LM con correcciones por PDS.	62
35	Gráfica comparativa de ψ obtenida con $w_{\alpha'}$.	63
36	Gráfica comparativa de Δ obtenida con $w_{\alpha'}$.	64
37	Gráfica comparativa de ψ obtenida con $w_{\beta'}$.	65
38	Gráfica comparativa de Δ obtenida con $w_{\beta'}$.	66
39	Ajuste paramétrico de α' y β' por LM. Configuración directa	68
40	Principales componentes espectrales de α' y β'	69
41	Ampliación de la TDF de α' y β' .	70
42	Dimensiones y eje de transmisión del polarizador	76

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
43	Diagrama del espejo colimador	77
44	Espectrómetro HR4000	79
45	Motor de pasos	79
46	Manejador de motores	80
47	Lámpara de Xenón	81
48a	Esquemático del circuito manejador de motores (parte 1)	83
48b	Esquemático del circuito manejador de motores (parte 2)	84
49	Esquemático del circuito detector del cero mecánico del polarizador y el analizador	85
50	Soporte principal	86
51	Plataforma para alineación	87
52	Montaje giratorio del polarizador/analizador	87
53	Módulo de polarización	88
54	Módulo de detección	89
55	Plataforma para la alineación de la muestra	89
56	Estación para mediciones estáticas	90

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
57	Panel principal	91
58	Panel de alineación	92
59	Panel de calibración	93

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Vectores de Jones	11
II	Matrices de Jones	12
III	Comparación entre elipsómetros espectroscópicos	30
IV	Señales de control del manejador de motores	80
IV	Señales para programar el tamaño de paso	81

Capítulo I

Introducción

I.1 Planteamiento del problema

La elipsometría es una técnica de análisis muy conocida que se utiliza comúnmente para la caracterización de películas delgadas. Se emplea principalmente para medir las propiedades ópticas y físicas de los materiales depositados, tales como el índice de refracción y el espesor. Si las mediciones se realizan *in-situ*, esta técnica permite modificar las condiciones del experimento (presión, mezcla de gases, temperatura, etc.) para obtener el perfil, composición y propiedades ópticas deseadas de películas duras, filtros ópticos, multicapas, etc.

Los elipsómetros comerciales tienen un alto costo, además de ser una caja cerrada a la que el usuario no puede hacer modificaciones o adaptaciones a sus necesidades particulares. Pedirle estas modificaciones al fabricante significa un costo adicional. Además, en caso de alguna reparación, o mantenimiento, se tiene que recurrir al fabricante del instrumento.

Como una alternativa a estas limitaciones, iniciamos este proyecto de desarrollo de un elipsómetro de analizador rotatorio. Conocidas las características técnicas y necesidades específicas del usuario, se desarrollará la ingeniería para satisfacerlas y construir un elipsómetro para el análisis *in-situ* del depósito de películas delgadas.

I.2 Antecedentes

Aunque la elipsometría es una técnica conocida desde hace ya varias décadas, en un principio su aplicación estuvo limitada a la caracterización estática de superficies y películas delgadas. Esto debido a que los elipsómetros con que se contaba en ese entonces eran manuales y monocromáticos (de tipo nulo), demasiado lentos para siquiera pensar en aplicaciones dinámicas. Fue a principio de los 60s cuando la aparición de las primeras computadoras de laboratorio hizo que los esfuerzos se centraran primero en automatizar las tediosas tareas de la adquisición y el análisis de los datos y después en extender las capacidades de la técnica al campo espectroscópico (Collins, 1990). A mediados de los 70s se desarrolló el primer elipsómetro espectroscópico automático (Aspnes y Studna, 1975) que, sin embargo, empleaba el mismo tipo de detector (tubo fotomultiplicador o PMT) que sus predecesores. Fue hasta finales de la década de los 80 y principios de los 90s que con los grandes avances en el campo de los semiconductores se desarrollaron los primeros elipsómetros espectroscópicos de tiempo real que utilizaban arreglos de fotodiodos (PDA, por sus siglas en inglés) como detectores y permitían el monitoreo de procesos en milisegundos (Ilsin et al, 1992). Con estos avances, la elipsometría *in-situ* se volvió una herramienta muy útil en la investigación y desarrollo de nuevos materiales, porque permite observar la evolución dinámica de los parámetros de interés como respuesta al cambio de las variables que intervienen en el proceso de depósito, y que no siempre es posible mantener bajo control.

I.3 Objetivo

- Diseñar y construir un elipsómetro capaz de obtener la información suficiente que permita analizar las propiedades ópticas y el espesor de películas delgadas durante el proceso de depósito. Deberá tener las siguientes características principales:
 - a) Precisión y exactitud comparables a las mostradas por elipsómetros comerciales.
 - b) Capaz de integrarse como lazo de retroalimentación en un sistema controlador de las condiciones de depósito

En la figura 1 se muestra un diagrama general de lo que será el sistema de medición instalado en la cámara de depósito.

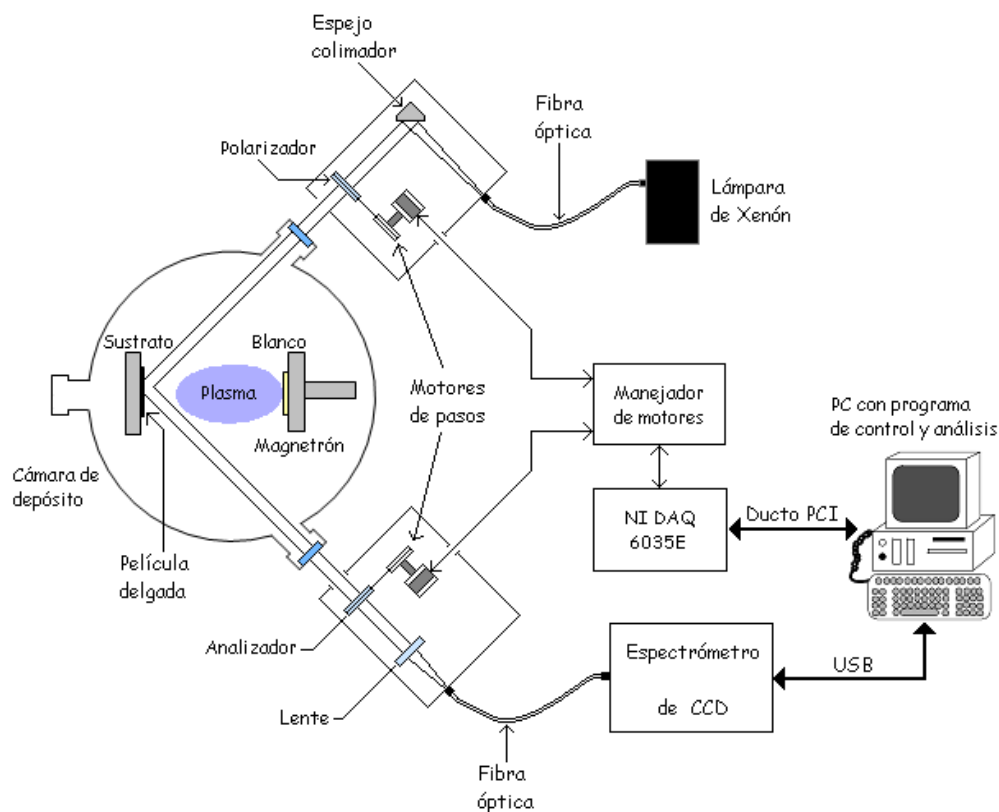


Figura 1. Diagrama general del sistema.

Capítulo II

Ondas electromagnéticas

II.1 La luz

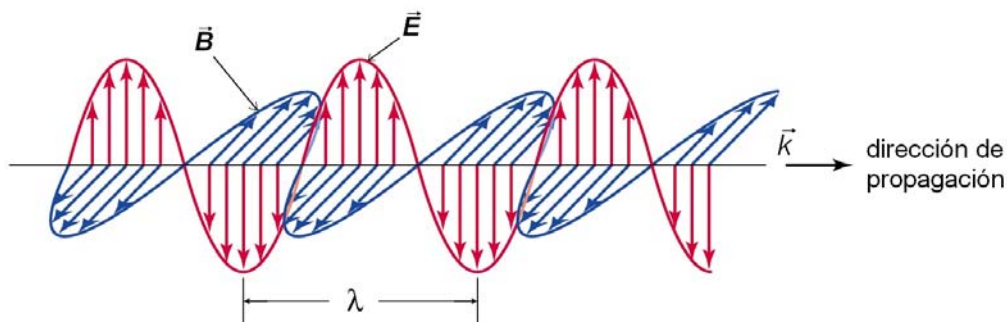


Figura 2. Onda electromagnética.

De acuerdo a la teoría electromagnética, la luz se compone de un campo eléctrico \vec{E} y un campo magnético \vec{B} , perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación \vec{k} , como se ilustra en la figura 2. Una onda electromagnética se puede representar en términos de su campo eléctrico únicamente. Siendo la relación entre los campos eléctrico y magnético: $E = cB$, donde c representa la velocidad de la luz en el espacio libre.

Para una onda plana que se desplaza en un medio uniforme e isotrópico la función de onda es:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \quad (1)$$

donde: $\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$ es el vector de posición, y

$\vec{k} = k_x\hat{i} + k_y\hat{j} + k_z\hat{k}$, el vector de propagación,

$\vec{k} = \frac{2\pi\tilde{n}}{\lambda}\vec{q}$, con \vec{q} un vector unitario en la dirección de propagación,

$\tilde{n} = n + jk$, es el índice de refracción complejo del medio de propagación.

En medios no absorbentes $k = 0$ y el índice de refracción es puramente real. Por ejemplo, para el espacio libre $\tilde{n} = n = 1$ (Hecht, 2002).

II.2 Luz polarizada

Cuando el vector de campo eléctrico de una onda de luz sigue una trayectoria bien definida se dice que se tiene *luz polarizada*. El estado de polarización más general es el elíptico, siendo la luz con polarización lineal y circular casos especiales de éste. El campo eléctrico de la luz polarizada puede representarse como un vector de dos componentes perpendiculares entre sí. Si la onda viaja en la dirección de \mathbf{z} , como se ilustra en la figura 3, la representación del vector de polarización sería:

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_x(z, t) + \vec{E}_y(z, t) \quad (2)$$

$$\vec{E}_x(z, t) = \hat{i}E_{0x} \cos(kz - \omega t + \delta_x) \quad (3)$$

$$\vec{E}_y(z, t) = \hat{j}E_{0y} \cos(kz - \omega t + \delta_y) \quad (4)$$

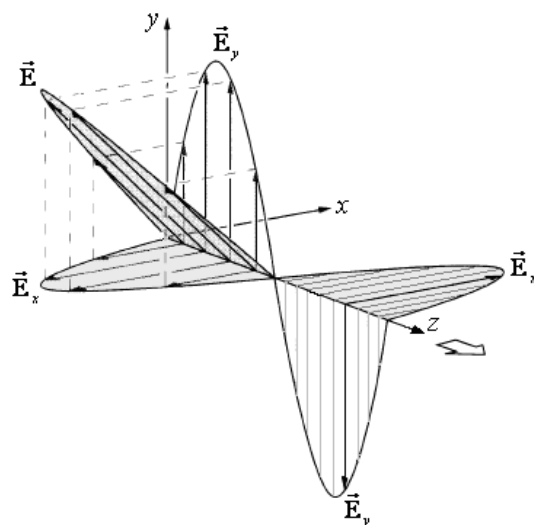


Figura 3. Orientación de los componentes del campo eléctrico.

A partir de la representación vectorial de \vec{E} (ver figura 4), dependiente de las magnitudes de sus componentes (E_{0x} y E_{0y}) y de la fase relativa entre ellas ($\delta_x - \delta_y$), se pueden obtener todos los estados de polarización (Hecht, 2002). En la figura 5 se muestran algunos ejemplos de estados de polarización de la luz.

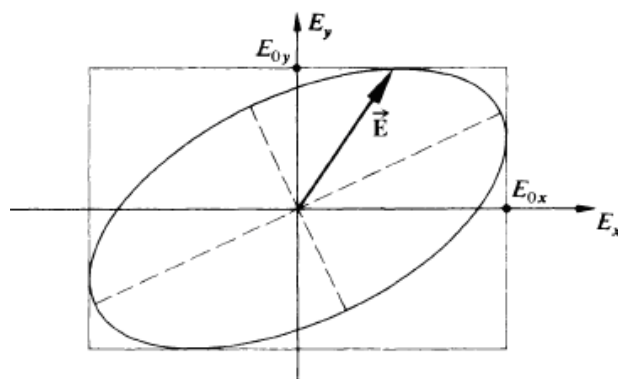


Figura 4. Vector de campo eléctrico para una polarización elíptica.

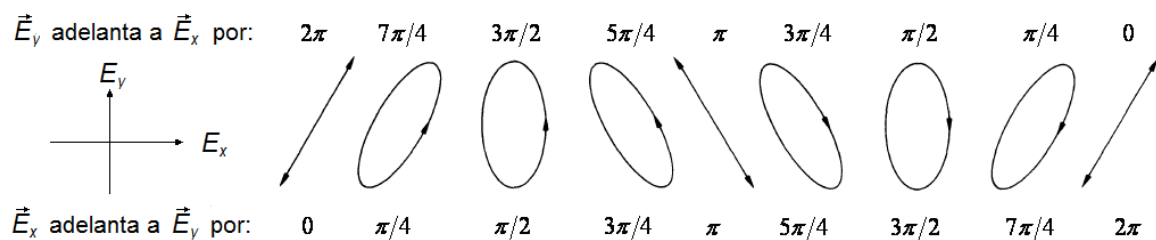


Figura 5. Varios casos de polarización elíptica.

La polarización sería circular si $\Delta = \pi/2$ ó $3\pi/2$ y $E_{0x} = E_{0y}$.

Como el estado de polarización de la luz no tiene dependencia del espacio ni del tiempo, se puede representar completamente en forma paramétrica como:

$$\rho = \tan \psi e^{j\Delta} \quad (5)$$

donde $\tan \psi$ es la relación entre las magnitudes de las componentes de \vec{E} , y Δ es la diferencia de fase relativa:

$$\tan \psi = \left| \frac{E_{0x}}{E_{0y}} \right| \quad (6)$$

$$\Delta = \delta_x - \delta_y \quad (7)$$

En la figura 6 se pueden identificar los parámetros que definen el estado de polarización.

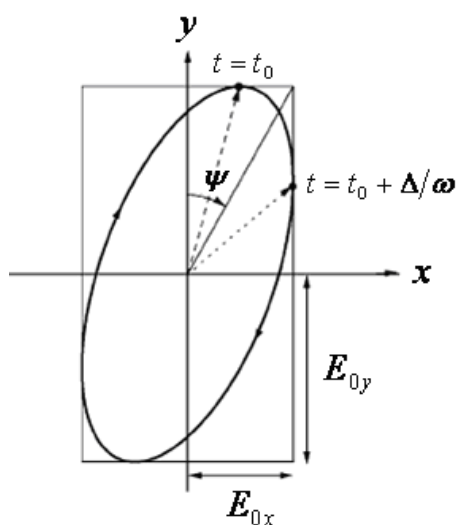


Figura 6. Representación paramétrica del estado de polarización.

En los experimentos elipsométricos es común expresar el estado de polarización de la luz tomando como referencia el plano de incidencia (formado por los haces incidente, reflejado y la normal a la superficie) y especificar los componentes del campo eléctrico en las direcciones \mathbf{p} y \mathbf{s} . La dirección \mathbf{p} cae en el plano de incidencia y la dirección \mathbf{s} es perpendicular a éste, de forma que junto con la dirección de propagación ($\vec{\mathbf{k}}$) forman un sistema de coordenadas cartesianas, como se ilustra en la figura 7 (J. A. Woollam Co., Inc., 1997).

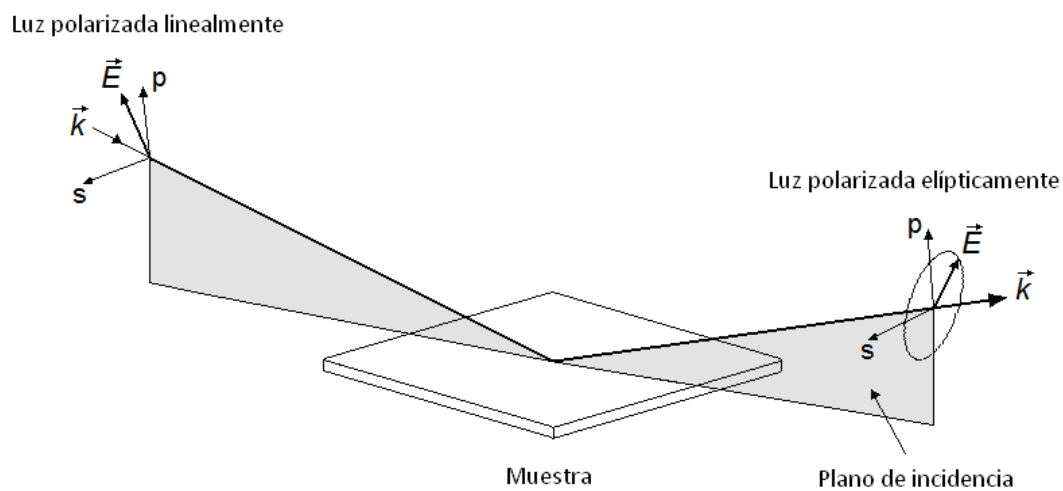


Figura 7. Ejes de polarización respecto al plano de incidencia.

En la figura 8 se muestra la representación del estado de polarización con el nuevo sistema coordenado.

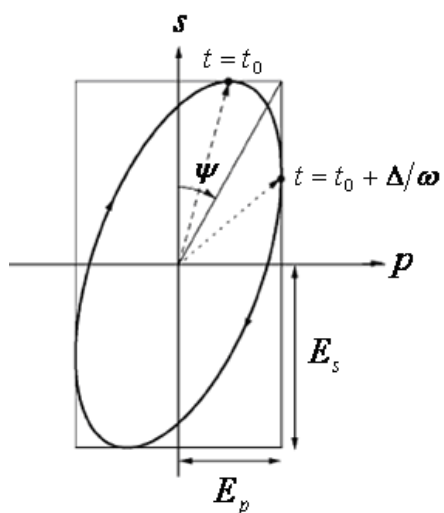


Figura 8. Representación de la polarización respecto al plano de incidencia.

II.3 Representación matricial del estado de polarización

II.3.1 Vectores de Jones

Los vectores de Jones son otra forma de representar el estado de polarización de la luz empleando los componentes del vector de campo eléctrico. Escrito en forma de columna el vector de Jones es:

$$\vec{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Si se conoce la información de la fase se está en condiciones de manejar ondas coherentes

$$\vec{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{j\phi_x} \\ E_{0y} e^{j\phi_y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

En muchas aplicaciones no es necesario conocer las amplitudes y fases exactamente, en tales casos se normaliza la irradiancia a la unidad, descartando alguna información pero obteniendo expresiones más simples. Esto se hace dividiendo ambos elementos del vector por el mismo escalar de tal forma que la suma de los cuadrados de los componentes sea igual a uno (Hecht, 2002).

Tabla I. Vectores de Jones.

Estado de polarización	Vector de Jones
Lineal horizontal (en p)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
Lineal vertical (en s)	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
Lineal a $+45^\circ$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
Lineal a -45°	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$
Circular con giro a la derecha	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$
Circular con giro a la izquierda	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$

II.3.2 Matrices de Jones

Las matrices de Jones son expresiones que describen matemáticamente el cambio que los elementos ópticos producen en el estado de polarización de una onda de luz. Cada elemento óptico tiene su propia matriz de transformación. Si un haz incidente con vector de Jones $\vec{\mathbf{E}}_i$ pasa a través de un elemento óptico con matriz de transformación \mathcal{A} , el haz emergente $\vec{\mathbf{E}}_r$ experimentará un cambio en su polarización de acuerdo con: $\vec{\mathbf{E}}_r = \mathcal{A}\vec{\mathbf{E}}_i$.

Si el haz pasa a través de una serie de elementos ópticos representados por las matrices $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2, \dots, \mathcal{A}_n$ entonces: $\vec{E}_t = \mathcal{A}_n \cdots \mathcal{A}_2 \mathcal{A}_1 \vec{E}_i$. Las matrices no conmutan, deben aplicarse en el orden correcto (Hecht, 2002).

Tabla II. Matrices de Jones.

Elemento óptico	Matriz de Jones
Polarizador lineal horizontal (en \mathbf{p})	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
Polarizador lineal vertical (en \mathbf{s})	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Polarizador lineal a $+45^\circ$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
Polarizador lineal a -45°	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$
Retardador de $\frac{1}{4}$ de onda, eje rápido vertical	$e^{i\pi/4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -j \end{bmatrix}$
Retardador de $\frac{1}{4}$ de onda, eje rápido horizontal	$e^{i\pi/4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & j \end{bmatrix}$
Polarizador circular con giro a la derecha	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & j \\ -j & 1 \end{bmatrix}$
Polarizador circular con giro a la izquierda	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ j & 1 \end{bmatrix}$

II.4 Irradiancia (I)

La irradiancia es la cantidad de luz que incide sobre una superficie. Se define como la energía promedio por unidad de área por unidad de tiempo. La irradiancia es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico y se mide en W/m^2 (Hecht, 2002).

$$I = \frac{c\varepsilon_0}{2} E^2 \quad (10)$$

$$I \propto E^2 \quad (11)$$

en donde:

c : velocidad de la luz en el espacio libre,

ε_0 : permitividad del espacio libre.

II.5 Reflexión y refracción

Cuando la luz incide sobre una superficie, parte de ella es reflejada y parte transmitida (ver figura 9). La dirección de la luz reflejada y transmitida se determina por las leyes de reflexión y refracción.

Ley de reflexión: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, $\theta_i = \theta_r$

Ley de refracción:

$$\tilde{n}_i \sin \theta_i = \tilde{n}_t \sin \theta_t, \quad (12)$$

donde:

$\tilde{n} = n + jk$: índice de refracción complejo,

n : índice de refracción,

k : coeficiente de extinción y

$$n = c/v,$$

donde:

c : velocidad de la luz en el espacio libre,

v : velocidad de la luz en el medio de propagación,

n y k son dependientes de la longitud de onda (λ).

$$n(\lambda) = n_1 + \frac{n_2}{\lambda^2} + \frac{n_3}{\lambda^4} \quad (13)$$

n_1, n_2, n_3 : son los coeficientes de Cauchy

$$k(\lambda) = k_1 + \frac{k_2}{\lambda^2} + \frac{k_3}{\lambda^4} \quad (14)$$

k_1, k_2, k_3 : son los coeficientes de extinción de Cauchy

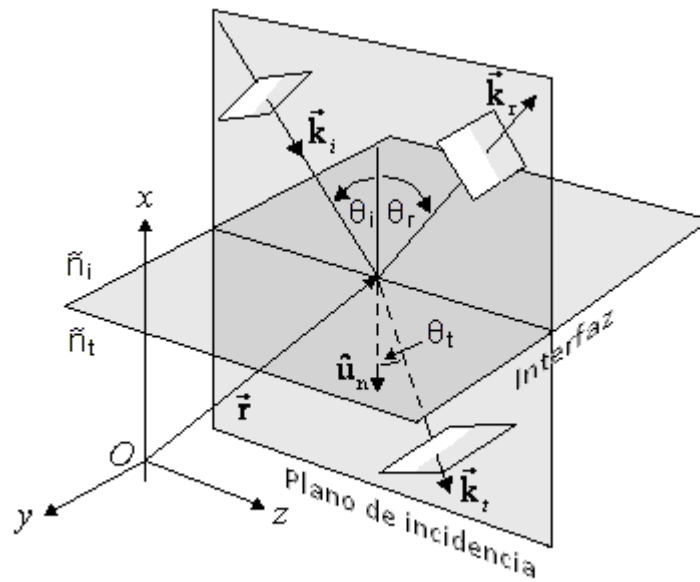


Figura 9. Reflexión y refracción.

II.6 Coeficientes de Fresnel

La relación de magnitudes de la luz reflejada y transmitida respecto a la luz incidente se determina por los coeficientes complejos de reflexión y transmisión, también conocidos como coeficientes de Fresnel.

Cuando el campo eléctrico es perpendicular (dirección \mathbf{s}) al plano de incidencia, como se ilustra en la figura 10, los coeficientes de Fresnel son:

$$\tilde{r}_{\perp} = \left(\frac{E_{or}}{E_{oi}} \right)_{\perp} = \frac{\tilde{n}_i \cos \theta_i - \tilde{n}_t \cos \theta_t}{\tilde{n}_i \cos \theta_i + \tilde{n}_t \cos \theta_t} \quad (15)$$

$$\tilde{t}_{\perp} = \left(\frac{E_{ot}}{E_{oi}} \right)_{\perp} = \frac{2\tilde{n}_i \cos \theta_i}{\tilde{n}_i \cos \theta_i + \tilde{n}_t \cos \theta_t} \quad (16)$$

$$\tilde{r}_\perp = \tilde{r}_s, \text{ y } \tilde{t}_\perp = \tilde{t}_s \quad (17)$$

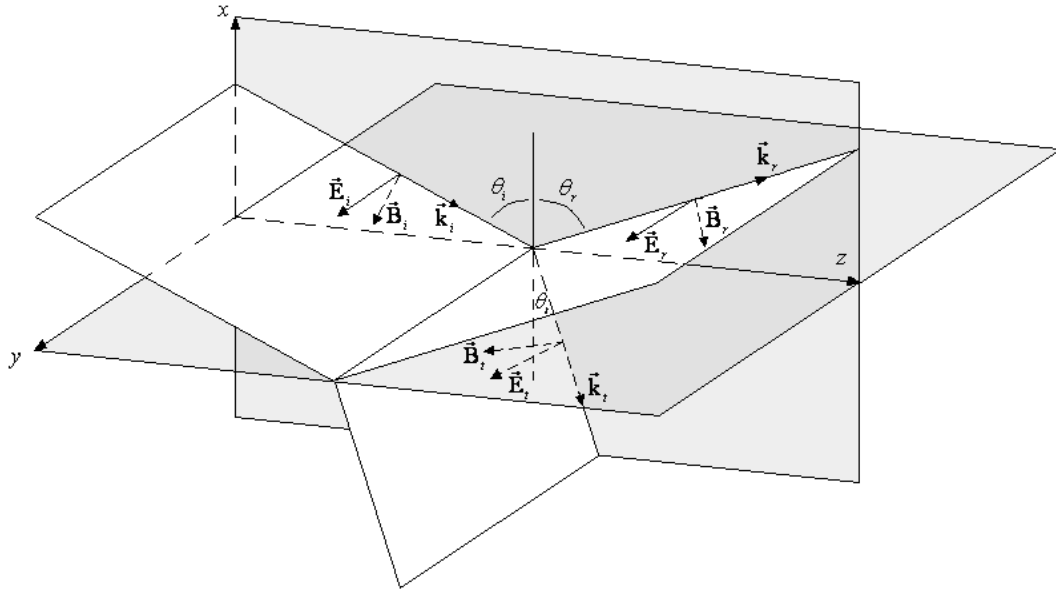


Figura 10. Reflexión y refracción con \vec{E} perpendicular al plano de incidencia.

Cuando el campo eléctrico es paralelo al plano de incidencia (dirección \mathbf{p}), como se ilustra en la figura 11, los coeficientes de Fresnel son:

$$\tilde{r}_\parallel = \left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)_\parallel = \frac{\tilde{n}_t \cos \theta_i - \tilde{n}_i \cos \theta_t}{\tilde{n}_t \cos \theta_i + \tilde{n}_i \cos \theta_t} \quad (18)$$

$$\tilde{t}_\parallel = \left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)_\parallel = \frac{2\tilde{n}_i \cos \theta_i}{\tilde{n}_t \cos \theta_i + \tilde{n}_i \cos \theta_t} \quad (19)$$

$$\tilde{r}_\parallel = \tilde{r}_p, \text{ y } \tilde{t}_\parallel = \tilde{t}_p \quad (20)$$

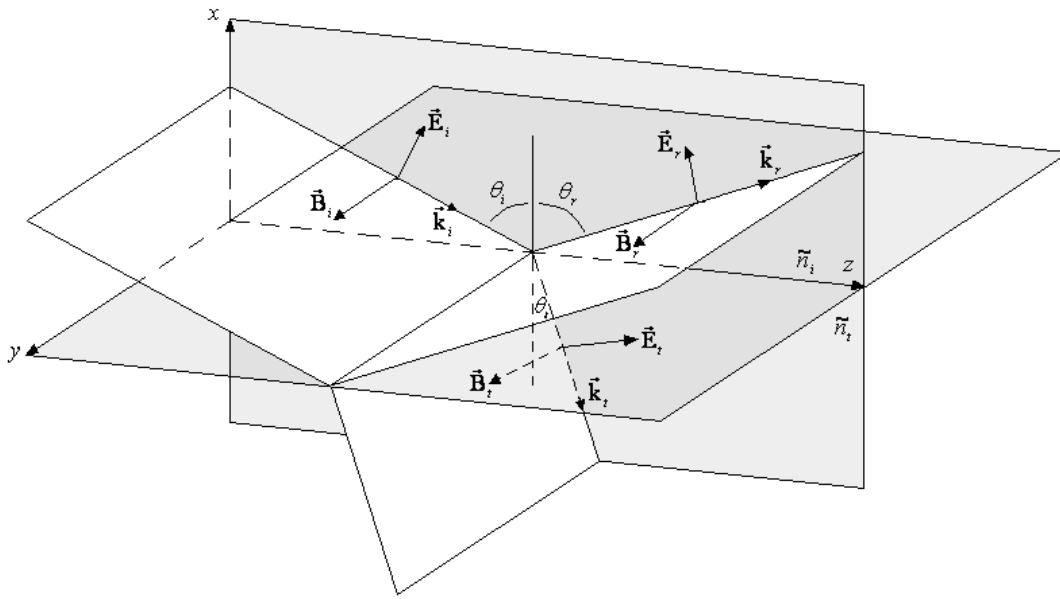


Figura 11. Reflexión y refracción con \vec{E} paralelo al plano de incidencia.

La polarización de un rayo incidente con componentes en \mathbf{p} y \mathbf{s} , como el de la figura 12, se representa por:

$$\tilde{\rho}_i = \frac{|E_{ip}|}{|E_{is}|} e^{j(\delta_{ip} - \delta_{is})} = \frac{|E_{ip}|}{|E_{is}|} e^{j\Delta_i} = \tan \psi_i e^{j\Delta_i} \quad (21)$$

y al ser reflejado su estado de polarización cambia a:

$$\tilde{\rho}_r = \frac{|E_{rp}|}{|E_{rs}|} e^{j(\delta_{rp} - \delta_{rs})} = \frac{|E_{rp}|}{|E_{rs}|} e^{j\Delta_r} = \tan \psi_r e^{j\Delta_r} \quad (22)$$

Se puede expresar la relación entre las polarizaciones incidente y reflejada como:

$$\frac{\tilde{\rho}_r}{\tilde{\rho}_i} = \frac{\frac{|E_{rp}|}{|E_{rs}|} e^{j\Delta_r}}{\frac{|E_{ip}|}{|E_{is}|} e^{j\Delta_i}} = \frac{|E_{rp}| e^{j\delta_{rp}} \cdot |E_{is}| e^{j\delta_{is}}}{|E_{rs}| e^{j\delta_{rs}} \cdot |E_{ip}| e^{j\delta_{ip}}} = \frac{\frac{|E_{rp}|}{|E_{ip}|} e^{j\delta_{rp}}}{\frac{|E_{rs}|}{|E_{is}|} e^{j\delta_{rs}}} = \frac{\frac{|E_{rp}|}{|E_{ip}|} e^{j\delta_p}}{\frac{|E_{rs}|}{|E_{is}|} e^{j\delta_s}} = \frac{\tilde{r}_p}{\tilde{r}_s} \quad (23)$$

Lo cual representa el cambio en el estado de polarización:

$$\tilde{\rho} = \tan \psi e^{j\Delta} = \frac{\tilde{r}_p}{\tilde{r}_s} \quad (24)$$

en donde: $\tan \psi = \left| \frac{E_{rp}/E_{ip}}{E_{rs}/E_{is}} \right|$ y $\Delta = \delta_p - \delta_s$

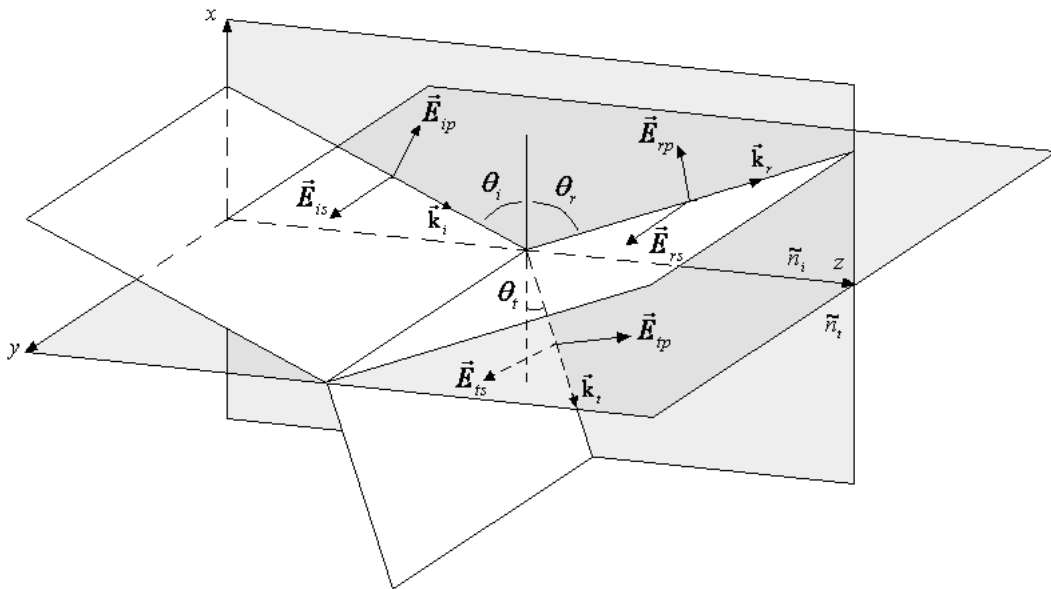


Figura 12. Reflexión y refracción en \mathbf{p} y en \mathbf{s} .

II.7 Coeficientes totales de reflexión

Cuando se tienen múltiples interfaces, como es el caso de las películas delgadas, se debe tomar en cuenta la luz reflejada en cada interfaz. Para un sistema de una sola capa como el de la figura 13, donde existen dos interfaces, los coeficientes totales de reflexión para los componentes en p y s son:

$$\tilde{\mathbf{R}}^p = \tilde{r}_{012}^p = \frac{\tilde{r}_{01}^p + \tilde{r}_{12}^p e^{j2\gamma}}{1 + \tilde{r}_{01}^p \tilde{r}_{12}^p e^{j2\gamma}} \quad (25)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}^s = \tilde{r}_{012}^s = \frac{\tilde{r}_{01}^s + \tilde{r}_{12}^s e^{j2\gamma}}{1 + \tilde{r}_{01}^s \tilde{r}_{12}^s e^{j2\gamma}} \quad (26)$$

\tilde{r}_{01} y \tilde{r}_{12} son los coeficientes de reflexión de Fresnel para la interfaz ambiente—película delgada y para la interfaz película delgada—sustrato, respectivamente.

En donde:

$$\gamma = 2\pi \left(\frac{d}{\lambda} \right) \tilde{n}_1 \cos \theta_1 = 2\pi \left(\frac{d}{\lambda} \right) \sqrt{\tilde{n}_1^2 - \tilde{n}_0^2 \sin^2 \theta_0} \quad (27)$$

$$\tilde{\rho} = \tan \psi e^{j\Lambda} = \frac{\tilde{\mathbf{R}}^p}{\tilde{\mathbf{R}}^s} \quad (28)$$

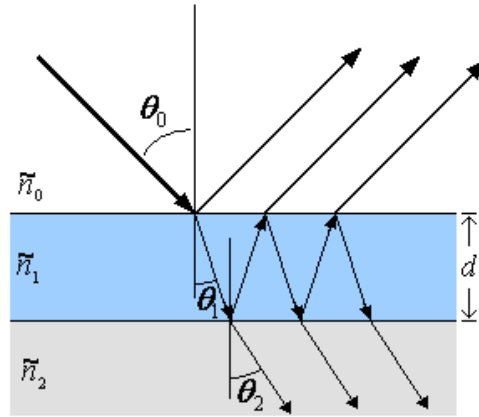


Figura 13. Reflexión en una capa.

En las ecuaciones anteriores d es el espesor de la película delgada y se ve claramente cómo el valor medido depende de la longitud de onda (λ) de prueba.

Para una estructura de multicapas (figura 14) se sigue un procedimiento similar al del caso anterior, en el cual primero se calcula el coeficiente de reflexión para la segunda capa y el sustrato.

$$\tilde{r}_{123}^p = \frac{\tilde{r}_{12}^p + \tilde{r}_{23}^p e^{j2\gamma_2}}{1 + \tilde{r}_{12}^p \tilde{r}_{23}^p e^{j2\gamma_2}} \quad (29)$$

en donde:

$$\gamma_2 = 2\pi \left(\frac{d_2}{\lambda} \right) \tilde{n}_2 \cos \theta_2 \quad (30)$$

y a partir de la ecuación (25) se obtiene el coeficiente total

$$\tilde{R}^p = \tilde{r}_{0123}^p = \frac{\tilde{r}_{01}^p + \tilde{r}_{123}^p e^{j2\gamma_1}}{1 + \tilde{r}_{01}^p \tilde{r}_{123}^p e^{j2\gamma_1}} \quad (31)$$

en donde:

$$\gamma_1 = 2\pi \left(\frac{d_1}{\lambda} \right) \tilde{n}_1 \cos \theta_1 \quad (32)$$

Los coeficientes de reflexión en **s** se calculan de la misma forma (Fujiwara, 2007).

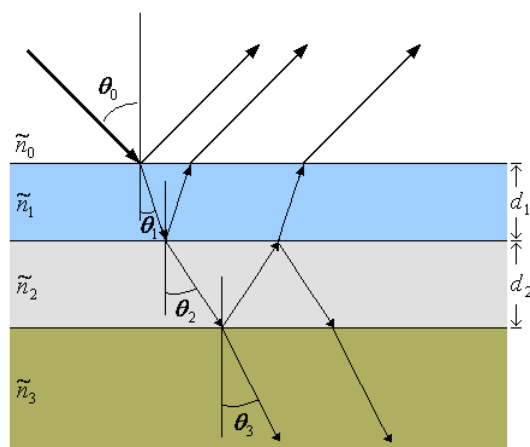


Figura 14. Reflexión en multicapas.

Si se determina el cambio de polarización que un sistema multicapas produce sobre el haz incidente, se pueden determinar los espesores d_n mediante el ajuste de los parámetros elipsométricos (ψ y Δ) al modelo óptico del sistema.

Capítulo III

Fundamentos de elipsometría

III.1 Elipsometría

La elipsometría es una técnica de análisis muy sensible que emplea luz polarizada para hacer mediciones de las propiedades ópticas de superficies y de películas delgadas. Mediante esta técnica se puede conocer el índice de refracción y el espesor de los materiales depositados (J. A. Woollam Co., Inc., 1997).

Si las mediciones se realizan durante el desarrollo de los depósitos se pueden modificar las condiciones dentro de la cámara (presión, mezcla de gases, temperatura, etc.) para obtener el perfil, composición y propiedades ópticas deseados para las películas.

III.2 Elipsómetro

Un elipsómetro es un instrumento opto-electrónico que mide el cambio de polarización que experimenta la luz al pasar por un medio o al reflejarse en una superficie (en nuestro caso, una película delgada). Cuantificando este cambio de polarización se pueden determinar las propiedades ópticas del material depositado y, mediante el ajuste de un modelo, su espesor.

III.3 Componentes básicos de un elipsómetro

Todas las configuraciones de elipsómetros inician con una fuente de luz y terminan con un detector, es el arreglo de los componentes ópticos entre la fuente y el detector lo que define el tipo de configuración usada. A continuación se da una descripción de los componentes más comunes.

III.3.1 Fuente de luz

La fuente de luz ideal para elipsometría debe ser estable y tener una salida de intensidad radiante constante en función de la longitud de onda en un amplio espectro que se extienda desde el ultravioleta (190 nm) hasta el infrarrojo cercano (2 μm). No existe tal fuente, pero las lámparas de arco de Xe (figura 15) o Hg-Xe son aproximaciones aceptables.

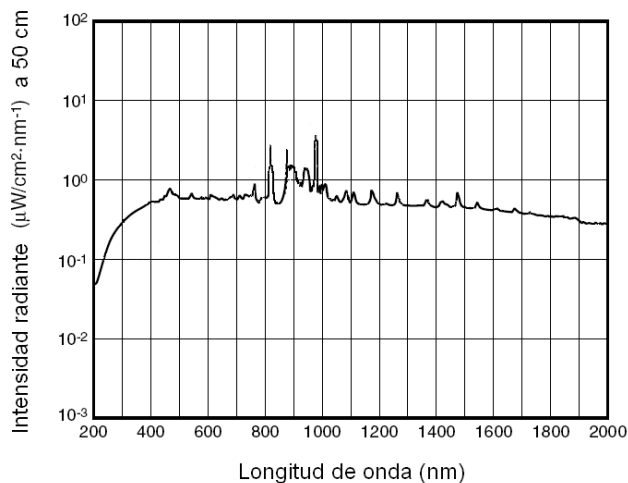


Figura 15. Espectro de la lámpara de xenón.

III.3.2 Polarizador y analizador

Un polarizador es un dispositivo óptico cuya función es generar un estado de polarización en la luz incidente. Dependiente de la forma de la salida se puede tener un polarizador lineal, elíptico o circular. Existen diferentes tipos de polarizadores, pero todos están basados en alguno de cuatro mecanismos físicos fundamentales: *dicroísmo*, *reflexión*, *dispersión* y *birrefringencia*. Sin embargo existe una propiedad esencial que todos comparten: algún tipo de asimetría asociada con el proceso (Hecht, 2002). Un ejemplo de polarizador dicroico es la turmalina (los silicatos de boro) y de birrefringentes el Glan-Focault y el Glan-Thompson que son construidos con cristales de calcita. El analizador es un elemento del mismo tipo que el polarizador que se coloca en la parte de detección

para determinar el estado de polarización del haz. En la figura 16 se muestran algunos ejemplos de polarizadores.

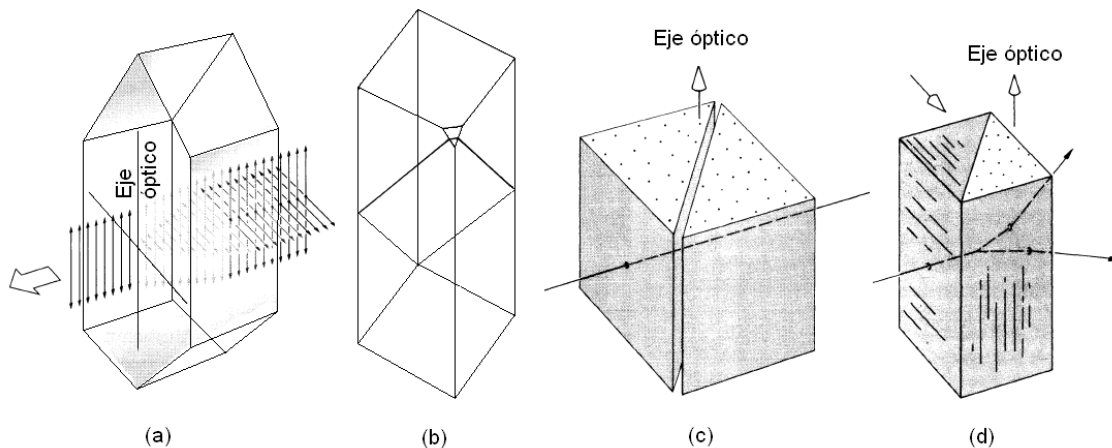


Figura 16. Algunos tipos de polarizadores. (a)Cristal dicróico, (b) prisma Nicol, (c) Glan-Focault, (d) prisma Wollaston.

III.3.3 Retardador y compensador

Un retardador es un elemento óptico que se utiliza para cambiar el estado de polarización de un haz incidente. El retardador provoca un retraso de fase de magnitud predeterminada sobre uno de los componentes del vector de polarización. El compensador es un dispositivo óptico capaz de introducir un retardo controlable en una onda incidente y por ende un cambio en la polarización de la misma (Hecht, 2002).

III.3.4 Detector

En general, en un elipsómetro se utiliza alguno de los siguientes tipos de detectores: a) *Fotomultiplicadores* (PMT por sus siglas en inglés), de elevado costo y con el problema de ser sensibles a la polarización y tener una respuesta

no lineal a la intensidad, b) *Fotodiodos* de silicio o de InGaAs, relativamente baratos, insensibles a la polarización y lineales sobre un amplio intervalo de intensidades y c) *Arreglos de fotodiodos* que permiten monitorear simultáneamente varias componentes espectrales de la luz incidente para realizar mediciones espectroscópicas (J. A. Woollam Co., Inc., 1997).

III.4 Tipos de elipsómetros

Los elipsómetros se pueden clasificar como de compensación o fotométricos, dependientes del principio en el que basen sus mediciones, espectroscópicos o monocromáticos, de acuerdo al número de longitudes de onda que puedan analizar y manuales o automáticos, de acuerdo a su operación (Collins et al, 2005).

III.4.1 Las configuraciones más comunes.

Las configuraciones más comunes de elipsómetros son: de tipo nulo, de elemento rotatorio (polarizador o analizador) y por modulación de fase.

1. Elipsómetro de compensación (Nulo).

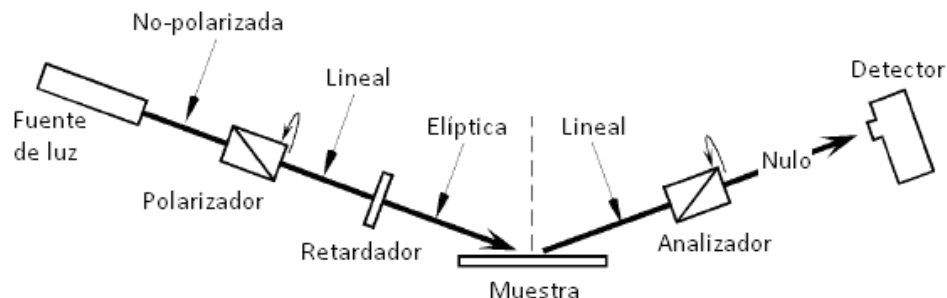


Figura 17. Elipsómetro monocromático tipo nulo.

Es un elipsómetro de compensación, con el esquema de *polarizador-retardador-muestra-analizador* (figura 17). El procedimiento consiste en encontrar el ajuste preciso de los componentes ópticos que extinga la luz en el detector. El retardador usualmente se fija para obtener una diferencia de fase de 90° entre las componentes del campo eléctrico. Las mediciones se realizan variando el acimut del polarizador de manera que la luz resultante, elípticamente polarizada, se refleje sobre la muestra como linealmente polarizada. El haz reflejado es extinguido ajustando el acimut del analizador. Los parámetros elipsométricos (ψ , Δ) se obtienen a partir de los ángulos acimutales del polarizador y del analizador que producen el “nulo”. Es un esquema muy sencillo el cual, utilizando una fuente láser y componentes ópticos de buena calidad, permite obtener medidas de alta precisión y exactitud aun al operarlo manualmente. En este tipo de elipsómetro no se considera tan importante la evaluación cuantitativa de la intensidad de la luz, el objetivo es detectar el mínimo (el cero idealmente). Generalmente son monocromáticos (Humlíček, 2005).

2. Elipsómetros fotométricos de elemento rotatorio.

Los elipsómetros de elemento rotatorio son fotométricos porque se basan en mediciones de la irradiancia incidente en el detector. Se dividen en dos secciones: una de generación de polarización y otra de detección de polarización. La primera consta de una fuente de luz, de un sistema óptico de colimación, de un polarizador y de un compensador (opcional). La segunda de un polarizador (llamado analizador), de un sistema óptico de enfoque (opcional) y de un detector de irradiancia (Collins et al, 2005).

A) Polarizador rotatorio.

La configuración general de este tipo de elipsómetro se muestra en la figura 18. El estado de polarización de la luz se modula haciendo girar el polarizador continuamente durante la medición. La frecuencia de giro es constante,

típicamente entre 10 y 100 rps. Los ángulos del compensador (si está presente) y del analizador se mantienen fijos durante la medición.

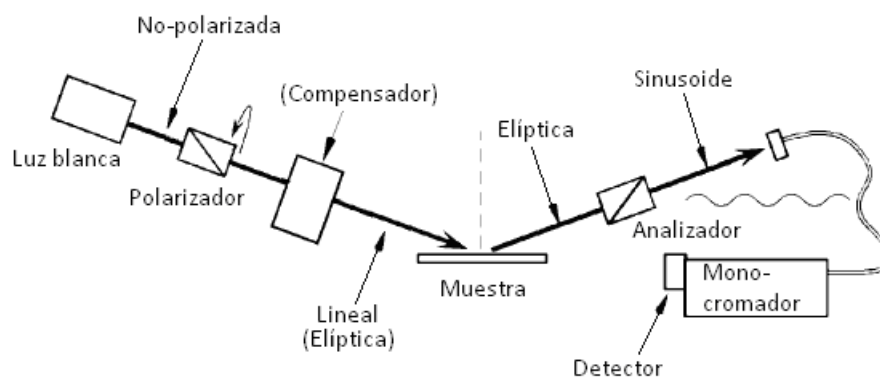


Figura 18. Elipsómetro espectroscópico de polarizador rotatorio.

B) Analizador rotatorio.

La configuración general de este tipo de elipsómetro se muestra en la figura 19. El brazo con la fuente de luz y el polarizador se utilizan para generar un haz de luz con polarización definida, el cual se hace incidir sobre la muestra. El brazo con el analizador y el detector se emplean para determinar el cambio en la polarización producido por la muestra. El analizador se hace girar continuamente a una frecuencia constante, típicamente entre 10 y 100 rps. Los ángulos del polarizador y el compensador (si está presente) permanecen fijos durante la medición.

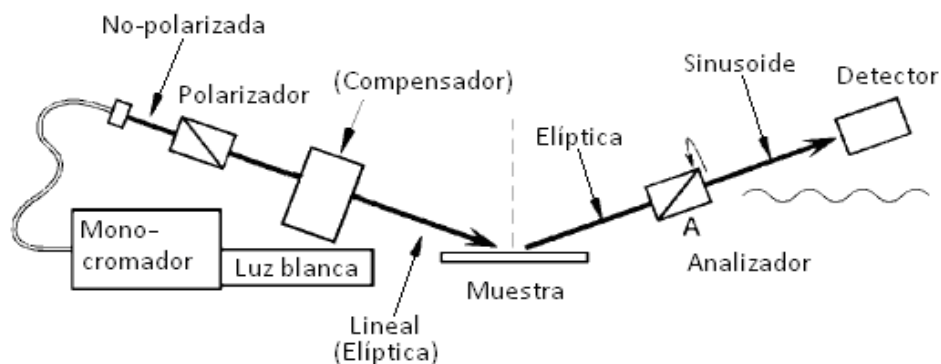


Figura 19. Elipsómetro espectroscópico de analizador rotatorio.

La rotación continua del analizador o del polarizador (dependiente del caso) produce como resultado que la intensidad de la luz en el detector varíe en forma sinusoidal. Mediante el análisis de Fourier de la señal de irradiancia obtenida del detector se pueden obtener los parámetros elipsométricos (ψ , Δ). Empleando una fuente de luz blanca y un monocromador se pueden obtener mediciones elipsométricas en diferentes longitudes de onda (espectroscópico).

3. Elipsómetros fotométricos por modulación de fase.

En esta configuración de tipo fotométrico (figura 20) el elemento clave es un modulador de fase de tipo piezobirrefringente el cual se opera normalmente a una frecuencia de 50 kHz. Este elemento modula el estado de polarización del haz incidente mientras los ángulos del polarizador y del analizador permanecen constantes. La señal de salida del detector, usualmente un fotomultiplicador, puede ser analizada por detección sensible a la fase o por digitalización y aplicación de la transformada discreta de Fourier (Collins et al, 2005).

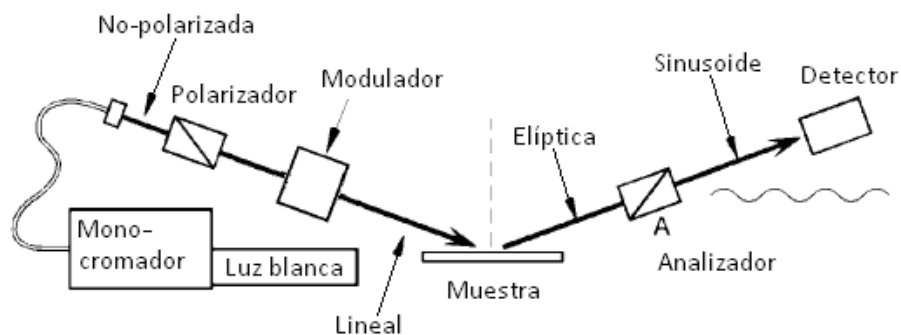


Figura 20. Elipsómetro de modulación de fase.

III.4.2 Comparación.

- *Precisión.* No existe una ventaja clara de un sistema respecto a otro, sin embargo los elipsómetros de compensación requieren una mayor irradiancia del haz para rebasar el límite del ruido de granalla. Con baja irradiancia la precisión se reduce debido a la corriente oscura del detector y al ruido asociado.
- Respecto al intervalo de valores favorables de los parámetros elipsométricos, los elipsómetros de compensación aventajan al resto porque obtienen ψ y Δ directamente de la medición de los ángulos del polarizador y del analizador. En contraste, para los otros dos tipos de elipsómetros automáticos la máxima precisión sólo es alcanzada en intervalos específicos de los parámetros elipsométricos ψ y Δ y necesitan de una instrumentación más compleja para eliminar los intervalos de baja precisión.
- En *exactitud*, el elipsómetro de compensación mantiene ventajas respecto a las alternativas fotométricas ya que puede mantener una alta exactitud en todas las regiones de (ψ, Δ) y no es influido adversamente por las no-linealidades del sistema de detección.

- En aplicaciones de tiempo real con una sola longitud de onda, donde el principal requisito sea la alta velocidad, la mejor opción es el elipsómetro de modulación de fase.
- En elipsometría espectroscópica la más alta velocidad en la adquisición de datos se logra con el elipsómetro de elemento rotatorio.
- Si se desea el más amplio intervalo espectral, el elipsómetro de elemento rotatorio es el indicado ya que puede ser diseñado sólo con elementos ópticos de MgF_2 (material con amplio intervalo de transmisión para longitudes de onda de 100 a 1000 nm) y puede trabajar con bajos niveles de iluminación (Collins, 1990).

En la tabla III se hace una comparación entre elipsómetros espectroscópicos y se muestra la precisión en los parámetros elipsométricos que se pretende cumplir con este instrumento.

Tabla III. Comparación entre elipsómetros espectroscópicos.

Técnica	Parám. determin.	Núm. de datos	Tiempo (s)	Precisión (grados)	Ref.
EE ¹	$(\psi, \Delta)\lambda$	200	3600	$\psi=0.0005$ $\Delta=0.001$	Aspnes y Studna, 1975
EETR ²	$\{(\psi, \Delta)\lambda\}t$	80000	3-600	$\psi=0.01$ $\Delta=0.02$	Muller y Farmer, 1984
EETR (AFD ³)	$\{(\psi, \Delta)\lambda\}t$	2×10^5	0.8-600	$\psi=0.01$ $\Delta=0.02$	Kim et al, 1990
EETR (AFD ³)	$\{(\psi, \Delta)\lambda\}t$	2×10^5	0.8-600	$\psi=0.003$ $\Delta=0.007$	Ilsin et al, 1992

¹EE: elipsometría espectroscópica,

²EETR: elipsometría espectroscópica de tiempo real,

³AFD: arreglo de fotodiodos.

Capítulo IV

Instrumentación

IV.1 La configuración elegida

Se decidió construir un elipsómetro de analizador rotatorio (EAR), en la configuración polarizador-muestra-analizador rotatorio (**PMA_{rot}**), por las ventajas que ofrece en cuanto a simplicidad de construcción, velocidad de adquisición de datos, alcance espectroscópico y facilidad para la alineación respecto de los tipos nulo y por modulación de fase. Se eligió un elipsómetro de tipo espectroscópico porque permite obtener una mayor cantidad de información de la muestra que el análisis con una sola longitud de onda.

El elipsómetro de analizador rotatorio es la mejor opción cuando el principal requisito son las medidas espectroscópicas precisas en un intervalo amplio de longitudes de onda. La simplicidad de este tipo de elipsómetro implica que los defectos del sistema, como la actividad óptica del polarizador y del analizador, pueden ser corregidos en la etapa de procesamiento de los datos. En aplicaciones de tiempo real este tipo de elipsómetros está limitado a procesos lentos como el crecimiento de películas a tasas de depósito menores a 10 Å/s (Collins, 1990).

La precisión y la exactitud del elipsómetro simple **PMA_{rot}** son óptimas para la detección de luz polarizada circularmente, pero muy pobre para la detección de luz polarizada lineal o cercana a lineal. Si se incluye un compensador en el sistema (**PCMA_{rot}**) se evita el problema de la pobre detección de luz linealmente polarizada, pero se introduce una dependencia de la longitud de onda y se reduce la exactitud absoluta. La inclusión del compensador también complica la tarea de alineación.

Una desventaja de los elipsómetros \mathbf{PMA}_{rot} en relación con los otros sistemas es su incapacidad de determinar el sentido de la generación del estado de polarización.

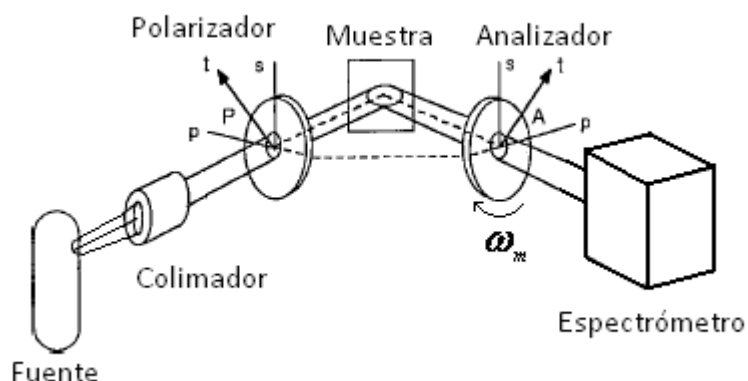


Figura 21. Secuencia de elementos en un elipsómetro espectroscópico \mathbf{PMA}_{rot} .

La figura 21 muestra la secuencia de elementos en la configuración elegida (\mathbf{PMA}_{rot}) incluidas la fuente de luz y el detector.

La luz de entrada se polariza linealmente con un ángulo P fijo y conocido del polarizador y al ser reflejada sobre la muestra cambia su estado de polarización de lineal a elíptica. El analizador, que se encuentra girando continuamente a una frecuencia rotacional ω_m , ocasiona que la irradiancia incidente en el detector varíe en forma sinusoidal.

A partir del análisis de la señal eléctrica del detector, se obtienen la información necesaria para calcular los parámetros elipsométricos Ψ y Δ , los cuales definen completamente el estado de polarización de la luz reflejada por la muestra.

IV.2 Modelo matricial del EAR

Con la configuración polarizador-muestra-analizador rotatorio (**PMA_{rot}**), el modelo matricial del elipsómetro se obtiene a partir de la correcta multiplicación de las matrices de Jones correspondientes a cada elemento dentro de la configuración (ver Tabla II en el Capítulo II). La expresión para el campo eléctrico incidente sobre el detector es la siguiente (J. A. Woollam Co., Inc., 1997):

$$\vec{\mathbf{E}}_D = \mathcal{A}_{\text{analizador}} \cdot \mathcal{A}_{\text{muestra}} \cdot \mathcal{A}_{\text{polarizador}} \cdot \vec{\mathbf{E}}_i$$

en donde \mathcal{A} representa la matriz Jones.

Con el propósito de ubicar el eje de transmisión del polarizador en la dirección \mathbf{p} debemos multiplicar la matriz del polarizador por una matriz de rotación para compensar el acimut (P) de su eje de transmisión respecto al plano de incidencia.

$$\mathcal{A}_{\text{polarizador}} = \begin{bmatrix} \cos P & -\sin P \\ \sin P & \cos P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

para una muestra isotrópica y no demasiado rugosa la matriz de Jones es:

$$\mathcal{A}_{\text{muestra}} = \begin{bmatrix} \tilde{r}_p & 0 \\ 0 & \tilde{r}_s \end{bmatrix} \quad (34)$$

La matriz de Jones del analizador también es multiplicada por una matriz de rotación (con ángulo A) de tal forma que la nueva dirección \mathbf{p} quede sobre el eje del analizador.

$$\mathcal{A}_{\text{analizador}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{bmatrix} \quad (35)$$

Para un sistema sin errores la expresión total del campo eléctrico en el detector queda:

$$\vec{\mathbf{E}}_D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{r}_p & 0 \\ 0 & \tilde{r}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos P & -\sin P \\ \sin P & \cos P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \vec{\mathbf{E}}_i \quad (36)$$

$$\vec{\mathbf{E}}_D = \begin{bmatrix} \tilde{r}_p \cos P \cos A + \tilde{r}_s \sin P \sin A \\ 0 \end{bmatrix} \vec{\mathbf{E}}_i \quad (37)$$

al desarrollar la relación $I_D \propto |\vec{\mathbf{E}}_D|^2$ y mediante el empleo de identidades trigonométricas se llega a la siguiente expresión:

$$I_D \propto I_0 \left[1 + \frac{\left| \frac{\tilde{r}_p}{\tilde{r}_s} \right|^2 - \tan^2 P}{\left| \frac{\tilde{r}_p}{\tilde{r}_s} \right|^2 + \tan^2 P} (\cos 2A) + \frac{2 \operatorname{Re} \left(\frac{\tilde{r}_p}{\tilde{r}_s} \right) \tan P}{\left| \frac{\tilde{r}_p}{\tilde{r}_s} \right|^2 + \tan^2 P} (\sin 2A) \right] \quad (38)$$

y por sustitución de la ecuación (24) en (38):

$$I_D \propto I_0 \left[1 + \frac{\tan^2 \psi - \tan^2 P}{\tan^2 \psi + \tan^2 P} (\cos 2A) + \frac{2 \tan \psi \cos \Delta \tan P}{\tan^2 \psi + \tan^2 P} (\sin 2A) \right] \quad (39)$$

se llega a una expresión teórica para la irradiancia incidente en el detector

$$I_D(t) \propto I_0 [1 + \alpha \cos 2A + \beta \sin 2A] \quad (40)$$

en donde α y β son los coeficientes de Fourier normalizados de la señal.

La ecuación anterior representa la irradiancia que emerge del analizador para un sistema sin errores. Si se consideran los errores acimutales en la posición del analizador y el polarizador, y el efecto del detector sobre la señal incidente (Collins, 1990), la señal eléctrica para la irradiancia se representa por

$$I_e(t) = I_0 \left[1 + \eta^{-1} \alpha \cos 2(A - As - \phi/2) + \eta^{-1} \beta \sin 2(A - As - \phi/2) \right] \quad (41)$$

en donde:

η^{-1} es el coeficiente de atenuación de corriente alterna del detector,

As es el error acimutal del analizador,

$\phi/2$ es el desfase producido por el detector,

después de manipular la ecuación (41) se llega a la siguiente expresión:

$$I_e(t) = I_0 \left[1 + \alpha' \cos 2A + \beta' \sin 2A \right] \quad (42)$$

donde α' y β' son los coeficientes de Fourier normalizados obtenidos experimentalmente y relacionados con los coeficientes teóricos mediante las ecuaciones

$$\alpha = \eta \left[\alpha' \cos 2(As + \phi/2) + \beta' \sin 2(As + \phi/2) \right] \quad (43)$$

$$\beta = \eta \left[-\alpha' \sin 2(As + \phi/2) + \beta' \cos 2(As + \phi/2) \right] \quad (44)$$

Experimentalmente no existe distinción alguna entre As y $\phi/2$ por lo que se pueden tratar como un sólo parámetro.

IV.3 Parámetros elipsométricos

Cuando se realiza una medición el objetivo es obtener los coeficientes de Fourier normalizados de la señal de irradiancia y a partir de ellos calcular los parámetros elipsométricos de interés (ψ , Δ). Por simple equivalencia de las ecuaciones (39) y (40) y con la inclusión del error acimutal del polarizador (P_s) se obtienen expresiones para α y β en función de ψ y Δ :

$$\alpha = \frac{\tan^2 \psi - \tan^2 P'}{\tan^2 \psi + \tan^2 P'} \quad (45)$$

$$\beta = \frac{2 \tan \psi \cos \Delta \tan P'}{\tan^2 \psi + \tan^2 P'} \quad (46)$$

con $P' = P - P_s$,

despejando para ψ y Δ como funciones de los coeficientes α y β :

$$\tan \psi = \sqrt{\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha}} |\tan P'| \quad (47)$$

$$\cos \Delta = \frac{\beta}{\sqrt{1 - \alpha^2}} \frac{\tan P'}{|\tan P'|} \quad (48)$$

Estas ecuaciones son la base de las mediciones elipsométricas para el EAR.

IV.4 El sistema de medición

El sistema dispone de una lámpara de arco de xenón como fuente de luz; un módulo de polarización, que se compone de un espejo colimador y un polarizador lineal de tipo Glan-Thompson montado en un mecanismo rotatorio y acoplado a un

motor de pasos; un módulo de detección, que es igual al de polarización excepto por el espejo colimador; y un espectrómetro de CCD lineal como detector.

La fuente de luz se acopla a través de una fibra óptica al módulo de polarización, el cual la polariza linealmente y la hace incidir con un ángulo específico sobre la muestra. La luz reflejada por la muestra se capta por el módulo de detección y se conduce por fibra óptica hasta el espectrómetro.

La señal del espectrómetro se adquiere a través del ducto USB de una computadora personal y mediante el programa de operación en LabVIEW se realiza el cálculo y análisis de la información de polarización para diferentes longitudes de onda.

Se utiliza una tarjeta de adquisición de datos NI 6035E para generar las señales de manejo de los motores de pasos y el disparo del espectrómetro.

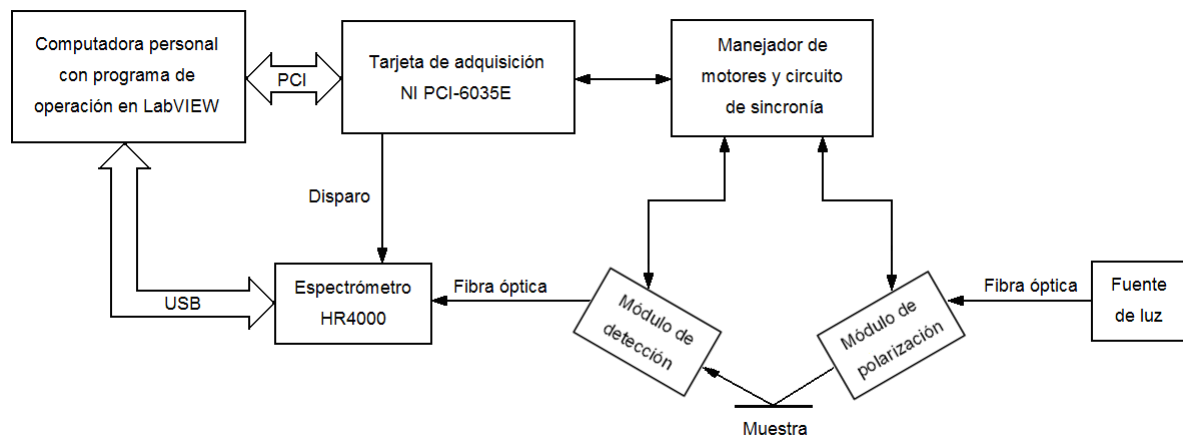


Figura 22. Diagrama de bloques del sistema de medición.

IV.5 El procedimiento de medición

IV.5.1 Consideraciones para la adquisición de la señal

IV.5.1.1 Cálculo de la irradiancia

En los elipsómetros de tipo fotométrico, como el EAR, el objetivo es obtener los coeficientes de Fourier experimentales α' y β' de la señal de irradiancia. El método para calcular estos coeficientes depende básicamente del tipo de detector empleado.

El espectrómetro utilizado en este proyecto (Ocean Optics HR4000) posee un CCD de arreglo lineal como detector (de 3648 pixeles), el cual integra la irradiancia incidente durante un tiempo de exposición predefinido (tiempo de integración). Los valores adquiridos por el espectrómetro están en número de cuentas por pixel y se convierten a valores de irradiancia mediante la siguiente ecuación

$$I_k = (S_k - D_k) \cdot \frac{C_k}{T \cdot A \cdot dL_k} \quad (49)$$

donde

k : representa el k -ésimo pixel del detector.

I_k : es la irradiancia calculada [$\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$],

S_k : es el espectro medido [cuentas/pixel],

D_k : es el espectro oscuro de referencia [cuentas/pixel],

C_k : es el espectro de calibración del espectrómetro proporcionado por el fabricante [$\mu\text{J}/\text{cuenta}$],

T : es el tiempo de integración [s],

A : es el área de captación representada por la sección transversal del núcleo de la fibra óptica [cm^2] y

dL_k : es la dispersión de la longitud de onda [nm/pixel]

$$dL_k = \frac{L(k+1) - L(k-1)}{2} \quad (50)$$

donde $L(k)$ es la longitud de onda representada por el centro del pixel k y que se obtiene mediante la siguiente ecuación polinomial de tercer orden

$$L(k) = \lambda_0 + c_1 p + c_2 p^2 + c_3 p^3 \quad (51)$$

donde:

$\lambda_0=367.88$ nm ;es la longitud de onda del pixel cero,

$c_1=0.1344$ nm/pixel; es el coeficiente de primer orden,

$c_2=-2.456 \times 10^{-6}$ nm/pixel²; es el coeficiente de segundo orden,

$c_3=-2.144 \times 10^{-10}$ nm/pixel³; es el coeficiente de tercer orden y

p : es el número de pixel.

De acuerdo a la ecuación (42) la señal eléctrica de la irradiancia en cada pixel del detector obedece la expresión

$$I_{ek}(t) = I_{0k} [1 + \alpha'_k \cos 2A + \beta'_k \sin 2A] \quad (52)$$

donde k representa el k -ésimo pixel del detector.

IV.5.1.2 Sincronización

Para iniciar la adquisición de muestras es necesario establecer sincronía entre la posición del analizador y el disparo del espectrómetro. Para lograr esto, se colocó una marca óptica sobre la montura del analizador que ubica el cero mecánico y se instaló un sensor óptico de reflexión (QRE1113GR), el cual produce un pulso de voltaje positivo cuando detecta dicha marca. La salida del detector es proporcional a la cantidad de luz reflejada, por lo tanto la duración, forma y magnitud del pulso dependen de las dimensiones de la marca óptica, la frecuencia de giro del analizador y la distancia entre el detector y la superficie reflejante. Para efectos de detección digital conviene tener un pulso bien definido, de duración y magnitud adecuados, por lo tanto el pulso de salida del detector se alimenta a un circuito acondicionador del pulso (74123) que detecta cuando el voltaje de entrada sobrepasa cierto umbral y produce un pulso TTL de 5 ms de duración, el cual indica al programa de operación que se ha encontrado el cero.

Debido al tiempo de adquisición relativamente largo del espectrómetro (4—6 ms), se toma una muestra cada 10 ms con tiempo de integración de 200 μ s. La frecuencia mecánica (f_m) del analizador se fija en 1 rps por lo que se adquieren 100 muestras por ciclo mecánico o 50 muestras por ciclo óptico ($N=50$). Un ciclo óptico se completa cada vez que los ejes de transmisión del polarizador y del analizador coinciden en el mismo plano, es decir dos veces por ciclo mecánico del analizador ($f_{opt}=2f_m$).

Como se mencionó en el párrafo anterior, el analizador gira a 1 rps y se adquieren 100 muestras por ciclo mecánico, es decir, una muestra cada ocho pasos del motor (ya que el motor se opera en cuartos de paso). Para llevar a cabo esto, se genera una frecuencia de 800 Hz (PASO_A) utilizando uno de los contadores de la tarjeta de adquisición, la cual se aplica al manejador del motor del analizador para girarlo a 1 rps. La señal PASO_A se introduce paralelamente a un segundo contador interno donde se divide para generar la señal de disparo del espectrómetro (DISP). La señal DISP tiene la frecuencia de muestreo y está comprometida con el tiempo mínimo de lectura del espectrómetro, la frecuencia de giro del analizador y la cantidad de muestras adquiridas por ciclo óptico.

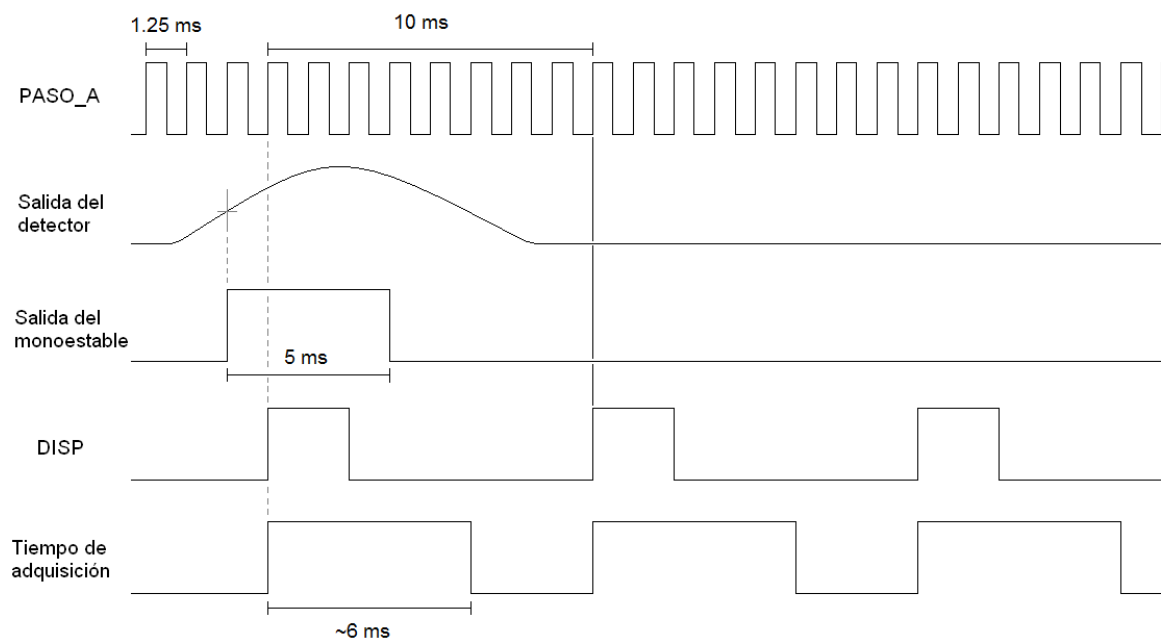


Figura 23. Señales de sincronía para la adquisición de espectros.

Cada flanco positivo de la señal PASO_A gira un cuarto de paso el analizador y cada ocho pulsos de PASO_A se produce un flanco positivo de la señal DISP la cual da inicio a un periodo de integración y adquisición. En la figura 23 se muestran las señales de sincronía.

También se instaló un sensor óptico en el polarizador con el propósito de localizar la referencia cero. La marca del cero mecánico se coloca de tal forma que se aproxime, en la medida de lo posible, al eje de transmisión del polarizador y del analizador ya que éste es la referencia para localizar el plano de incidencia en las rutinas de calibración.

IV.5.2 Adquisición de muestras

Con el polarizador fijo en el ángulo de operación P el analizador se gira continuamente a la frecuencia antes mencionada, pero es a partir de la detección del cero cuando el programa inicia la adquisición de muestras. Teóricamente sería suficiente con adquirir muestras durante un ciclo óptico para obtener la información necesaria que lleve al cálculo de los parámetros elipsométricos ψ y Δ , sin embargo el ruido y los problemas de alineación hacen necesario adquirir y promediar un número mayor de ciclos ópticos con el fin de atenuar dichos problemas. Para mejorar la relación señal a ruido (SNR por sus siglas en inglés) se adquieren y promedian M ciclos ópticos consecutivos, lo que da una mejora de \sqrt{M} en la SNR (Lyons, 1977).

A partir de los ciclos promediados se calculan los coeficientes normalizados α' y β' para cada pixel mediante el análisis por transformada discreta de Fourier (TDF) aplicando las ecuaciones (53) a (55).

La frecuencia mecánica del analizador no cumple con la recomendación hecha en la literatura de fijarla dentro del intervalo de 10—100 rps, sin embargo, fue

necesario tomar esta medida debido a que el tiempo de adquisición del espectrómetro es relativamente grande e incrementar la frecuencia mecánica afectaría significativamente el número de muestras adquiridas por ciclo óptico, y con esto, la fidelidad de la señal.

Aunque no se da una razón explícita para fijar la frecuencia del analizador dentro del intervalo mencionado, se entiende que la intención es alejarse de la frecuencia de resonancia de los mecanismos giratorios y de los motores.

$$\alpha'_k = \frac{2 \sum_{q=0}^{N-1} I_q \cos(2\pi q/N)}{\sum_{q=0}^{N-1} I_q} \quad (53)$$

$$\beta'_k = \frac{2 \sum_{q=0}^{N-1} I_q \sin(2\pi q/N)}{\sum_{q=0}^{N-1} I_q} \quad (54)$$

$$I'_{0k} = \frac{1}{N} \sum_{q=0}^{N-1} I_q \quad (55)$$

en donde k representa el k -ésimo pixel y q representa la q -ésima muestra adquirida por el k -ésimo pixel.

IV.5.3 Corrección por parámetros de calibración

La corrección por parámetros de calibración consiste en compensar los coeficientes experimentales α'_k y β'_k por los errores acimutales del polarizador y del analizador (A_s y P_s) y por el factor de atenuación η . Simplemente se aplican

las ecuaciones (43) y (44) a los coeficientes medidos. A_s , P_s y η se obtienen mediante el proceso de calibración que se describe en el Capítulo V.

IV.5.4 Cálculo de ψ y Δ

Una vez que se han obtenido los parámetros de calibración y corregido los coeficientes experimentales, se procede a calcular los parámetros elipsométricos utilizando las ecuaciones (47) y (48). A partir de estos resultados se obtienen Ψ_k y Δ_k .

IV.6 El programa de operación

Es la interfaz con el usuario y tiene el propósito de minimizar la participación de éste en las tareas relativas al funcionamiento del instrumento, otorgándole un papel más bien de supervisor que de operador. De esta manera, sólo los campos indispensables se dejan bajo control del usuario, como la elección de la longitud de onda, el tiempo de integración y el número de ciclos ópticos por promediar.

El programa consta de varias rutinas que se deben ejecutar de forma secuencial:

- a) Alineación. Es la primera acción que se debe ejecutar al iniciar el sistema y/o al colocar una nueva muestra. Aunque ésta es una tarea que se lleva a cabo manualmente, el programa auxilia al usuario desplegando gráficas que le permiten monitorear el proceso de la alineación. Esta es la única opción habilitada al iniciar el programa.

- b) Calibración. Esta opción se habilita inmediatamente después de efectuar la alineación. La calibración del instrumento se realiza automáticamente, no requiere intervención del usuario salvo para elegir la longitud de onda y el tiempo de integración. Durante esta rutina se activa una ventana emergente

que muestra gráficas con el progreso de la calibración y al final despliega los valores de los parámetros de interés. El procedimiento de calibración empleado se describe en el Capítulo V.

- c) Medición. Una vez que el instrumento se ha alineado y calibrado se puede proceder a medir la muestra. Se puede elegir entre dos tipos de medición, estática y dinámica. En el modo estático se obtienen y despliegan los parámetros ψ y Δ en función de la longitud de onda. Se realiza una sola medición a todas las longitudes de onda, con tiempo de integración y número de ciclos ópticos especificados. En el modo dinámico, se realizan mediciones continuas y se calculan y grafican ψ y Δ en función del tiempo para una longitud de onda, tiempo de integración y número de ciclos ópticos especificados. Aunque en el modo dinámico sólo se grafican los datos para una longitud de onda, en el archivo de salida se registran los valores para todo el intervalo espectral.

La presentación de los resultados se hace mediante gráficas en pantalla y archivos de salida compatibles con la hoja de cálculo Excel y con programas de interpretación de datos como el WVASE32.

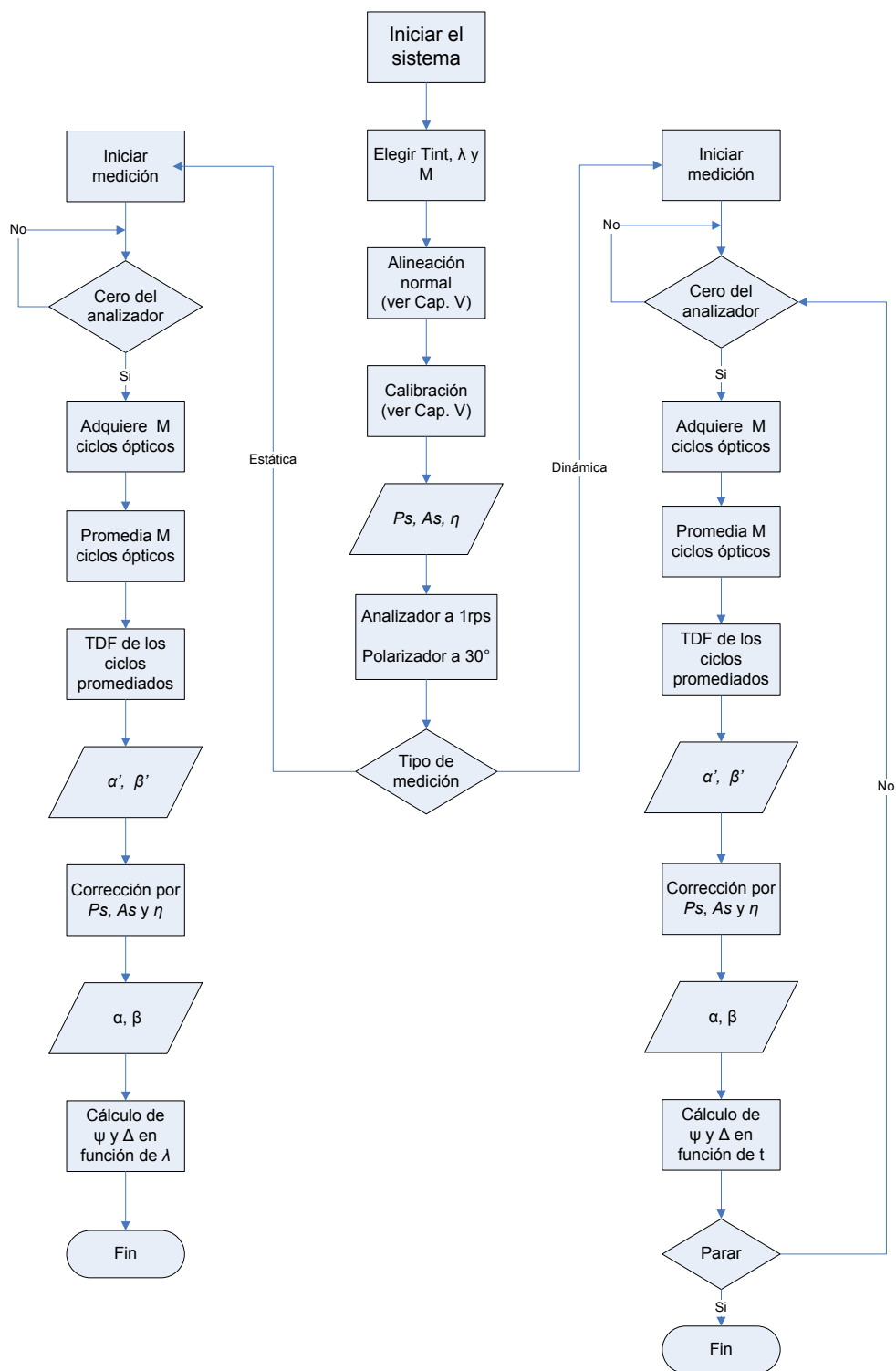


Figura 24. Diagrama de flujo del procedimiento de medición.

IV.7 Monturas rotatorias del polarizador y del analizador

En un elipsómetro de elemento rotatorio, como el PMA_{rot} , el analizador se debe mantener girando continuamente mientras se realizan las mediciones, por lo cual es necesario montar el analizador en un mecanismo que sea capaz de rotarlo a frecuencias adecuadas (10—100 rps) para la adquisición y análisis de la señal (Collins, 1990). Por su parte, el polarizador también debe ser girado a ciertos ángulos predefinidos durante el procedimiento de calibración y ser regresado a su posición de trabajo P . Para tal efecto se diseñó una montura especial (figura 25) que consiste de un balero sujeto a un marco fijo y un cilindro hueco donde se introduce el polarizador/analizador.

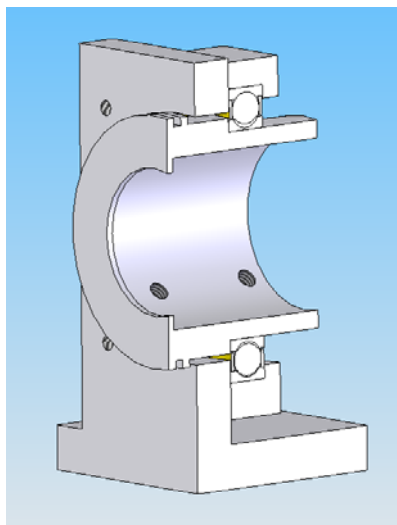


Figura 25. Vista seccional de la montura del polarizador y del analizador.

Este mecanismo se hace rotar mediante una banda de hule y una polea montada en la flecha de un motor de pasos (figura 26).

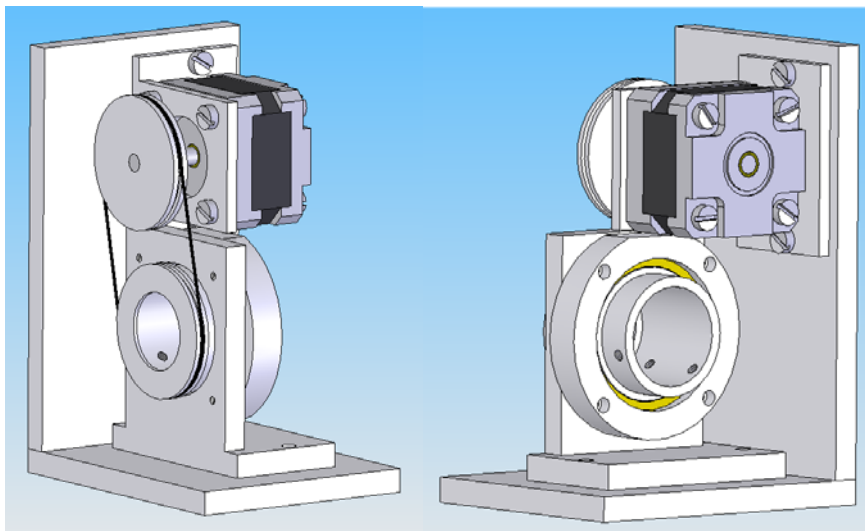


Figura 26. Mecanismo giratorio del polarizador y del analizador.

IV.8 La estación para mediciones

Para realizar mediciones estáticas se construyó una estación basada en el elipsómetro comercial Woollam M-88. Esta estación posee un par de bases fijas, donde se montan los módulos de polarización y de detección, que permiten variar el ángulo de incidencia del haz de prueba; también posee una plataforma de altura ajustable donde se coloca la muestra bajo estudio (figura 27).

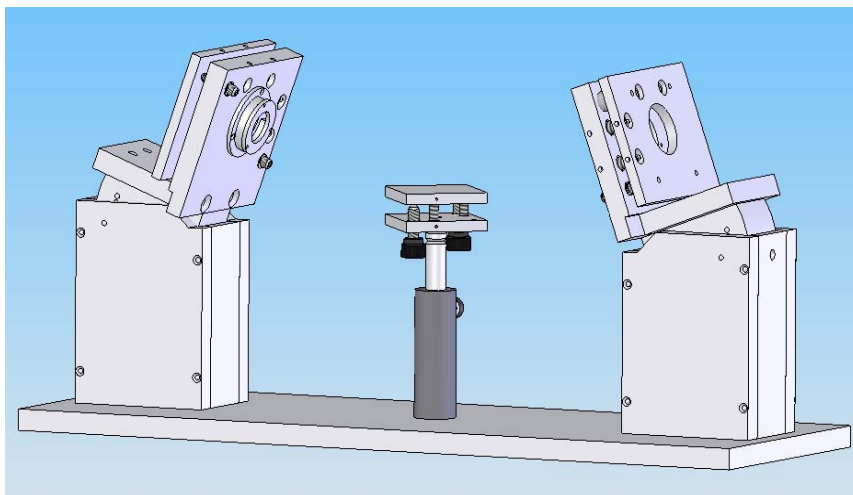


Figura 27. La estación para mediciones estáticas.

Tanto las bases fijas como la plataforma de la muestra poseen un mecanismo para el ajuste de la inclinación basado en resortes de extensión y tornillos de rosca fina (figura 28). Estos mecanismos permiten realizar la alineación polarizador-muestra-analizador, es decir, encontrar el plano de incidencia.

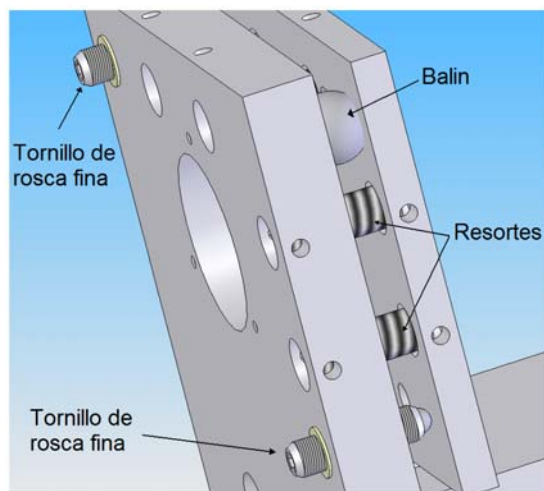


Figura 28. Detalle de los mecanismos de ajuste.

Capítulo V

Puesta a punto del instrumento

V.1 Alineación

Antes de operar el elipsómetro por primera vez deben alinearse los módulos de polarización y detección para lograr una trayectoria directa del haz de prueba que garantice la coincidencia del sistema polarizador-muestra-analizador en el plano de incidencia. El diseño de las plataformas de alineación permite un ajuste preciso en la orientación de los módulos, sin embargo, existen errores de construcción en las monturas giratorias del polarizador y del analizador que ocasionan la deflexión del haz de prueba y complican la tarea de alineación.

V.1.1 Alineación directa

La alineación directa consiste en colocar ambos módulos en la posición horizontal (90° con la normal) y encontrar la orientación en la cual el haz de prueba sea una línea normal a las superficies del polarizador y del analizador, ver figura 29. Esta alineación se debe realizar antes de operar el elipsómetro por primera vez y cada vez que sean desmontados los módulos de polarización y/o detección de sus respectivas plataformas de ajuste. La forma de llevar a cabo la alineación directa se describe a continuación:

1. Se pone a girar el polarizador a una frecuencia mecánica baja (2 rps) que permita observar con detalle la deflexión del haz.
2. Se ajusta la inclinación del módulo de polarización para centrar el haz sobre una referencia física en el módulo de detección. Esta acción garantiza el paralelismo entre la cara del polarizador y la base fija de la plataforma de ajuste del módulo de detección.

3. Se pone a girar el analizador y se ajusta la inclinación del módulo de detección para centrar el haz incidente sobre un aditamento especial diseñado para este proceso.
4. Se coloca el conector de la fibra óptica y se ajusta su posición mientras se observa en el programa de operación la simetría entre ciclos ópticos consecutivos de la señal.

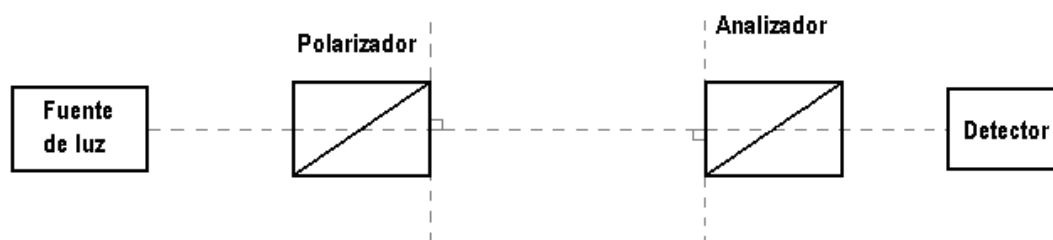


Figura 29. Orientación de los componentes ópticos durante la alineación directa.

V.1.2 Alineación normal

Se debe hacer cada vez que se instala una nueva muestra y su propósito es encontrar el plano de incidencia *polarizador-muestra-analizador*. Este tipo de alineación se lleva a cabo de la siguiente forma:

1. Se pone a girar el polarizador a una frecuencia mecánica baja (2 rps) que permita observar con detalle la deflexión del haz.
2. Se ajusta la inclinación de la plataforma de la muestra para centrar el haz sobre una referencia física en el módulo de detección mientras se observa

en el programa de operación la simetría entre ciclos ópticos consecutivos de la señal.

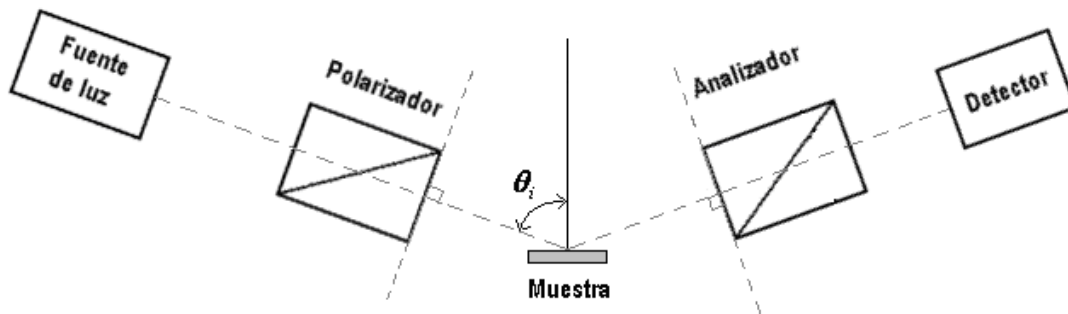


Figura 30. Orientación de los componentes ópticos durante la alineación normal.

V.1.3 Detección de errores de alineación

La alineación del elipsómetro se puede verificar midiendo la simetría relativa de ciclos ópticos consecutivos (correspondientes a un mismo ciclo mecánico). Un sistema apropiadamente alineado no debe mostrar diferencia entre los valores pico de máximos consecutivos de la señal para cualesquiera condiciones de operación. Las pequeñas diferencias observadas en un sistema mal alineado se atribuyen a la ligera variación sistemática en el ángulo de incidencia del haz sobre las superficies, lo cual produce pequeños cambios en la cantidad de luz reflejada en esas superficies y la consecuente asimetría en la intensidad detectada (Aspnes y Studna, 1975).

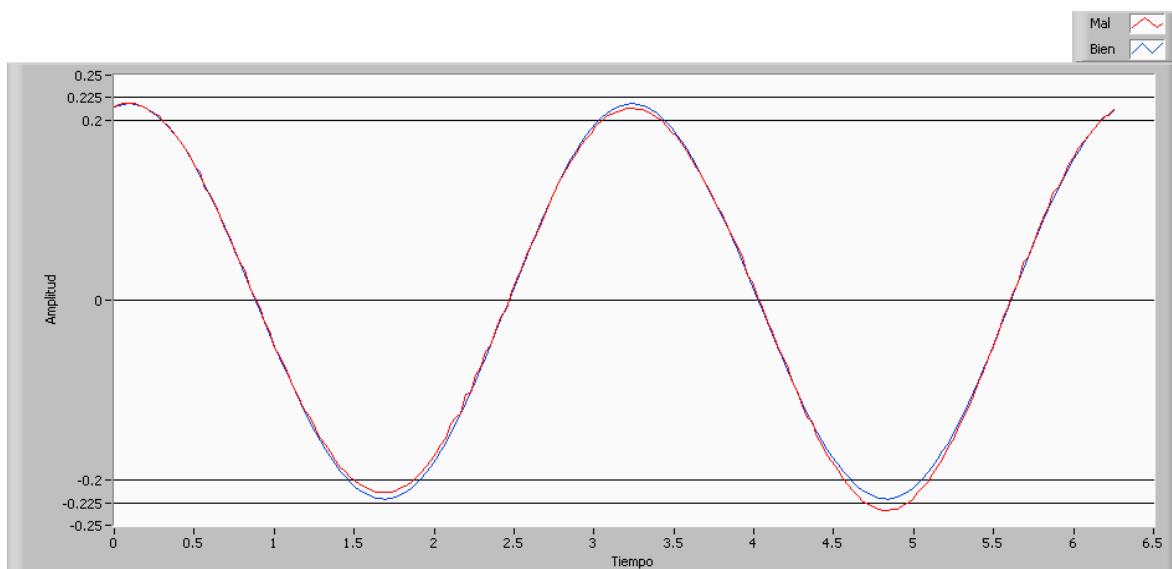


Figura 31. Ejemplo de diagnóstico de la alineación de un sistema. El trazo azul representa un sistema bien alineado y el trazo rojo es el caso contrario.

V.2 Calibración

La calibración del sistema, al igual que la alineación normal, debe realizarse cada vez que se instala una nueva muestra para ser analizada. Mediante el procedimiento de calibración se obtiene la información necesaria para calcular la relación compleja de los coeficientes de reflexión a partir de los coeficientes de Fourier experimentales α' y β' .

V.2.1 Los parámetros de interés

Los parámetros de calibración P_s y A_s son los errores acimutales de los ejes de transmisión del polarizador y del analizador respecto al plano de incidencia, se miden en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj y se observa en dirección opuesta a la propagación de la luz. Estos parámetros representan el error entre el ángulo real y el ángulo medido. El parámetro η representa el factor

de atenuación de corriente alterna del detector. La forma de obtener estos parámetros depende del método de calibración empleado.

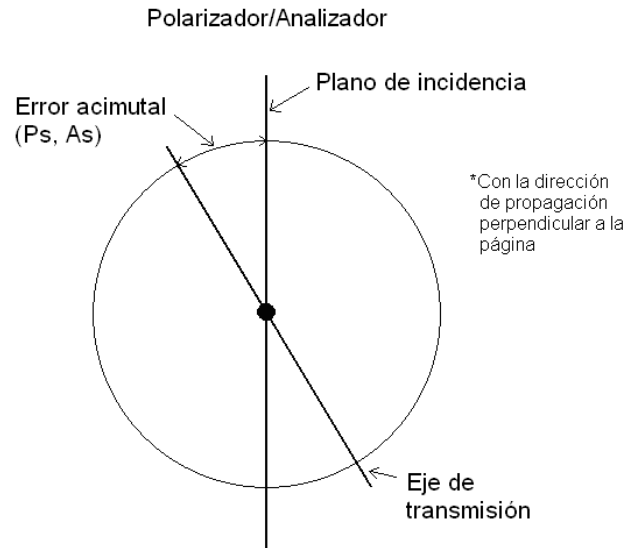


Figura 32. Definición de As y Ps.

V.2.2 Los procedimientos de calibración

Existen tres métodos principales de calibración reportados en la literatura, los cuales son: por función residual, por diferencia de fase y por regresión. El método más sencillo de realizar es el de función residual (Aspnes y Studna, 1975) y, bajo condiciones óptimas, es relativamente rápido y preciso. Este método se basa en hacer mediciones de la función residual, que se define como:

$$R(P) = 1 - (\alpha'^2 + \beta'^2) \quad (56a)$$

$$R(P) = 1 - \eta^{-2}(\alpha^2 + \beta^2) \quad (56b)$$

$$R(P) = (1 - \eta^{-2}) + \eta^{-2} \left[\frac{\sin 2\psi \sin \Delta \sin 2(P - P_s)}{1 - \cos 2\psi \cos 2(P - P_s)} \right]^2 \quad (56c)$$

en un intervalo pequeño de ángulos del polarizador alrededor de 0° , donde exhibe un comportamiento parabólico. El procedimiento para calcular P_s consiste en ajustar un polinomio de segundo grado a $R(P)$ y encontrar el valor de P que minimice la función de ajuste. El factor de atenuación η , se obtiene de la ecuación (56c) y del valor de la función de ajuste en $P=P_s$.

Para obtener A_s se calcula la función de fase $\Theta(P)$,

$$\Theta(P) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\beta'}{\alpha'} \right) \quad (57a)$$

$$\Theta(P) = A_s + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\beta}{\alpha} \right) \quad (57b)$$

$$\Theta(P) = A_s + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{\sin 2\psi \cos \Delta \sin 2(P - P_s)}{\cos 2(P - P_s) - \cos 2\psi} \right] \quad (57c)$$

se ajusta una recta y se evalúa la mejor aproximación en $P=P_s$.

De la ecuación (56c) se puede observar que la precisión con la que P_s puede ser determinado, disminuye a medida que $|\Delta|$ se acerca a 0° o 180° y falla completamente para $\Delta=0^\circ$ o 180° . Esto limita el tipo de muestras, ángulos de incidencia y longitudes de onda que pueden usarse para la calibración.

Este método trabaja bien para metales en general pero cuando se aplica a semiconductores o sustratos no absorbentes pierde su utilidad.

El método por diferencia de fase es complementario del método por función residual, pues permite determinar P_s con gran precisión en los intervalos donde éste falla, es decir cuando $|\Delta| < 30^\circ$ y $|\Delta| > 150^\circ$. El procedimiento es idéntico al de la función residual hasta obtener P_s , a partir de ahí, el siguiente paso es calcular la precisión de P_s (de Nijs et al, 1988) y derivar un criterio que ayude a decidir cuándo es aplicable el método de la función residual y cuándo se debe proceder a la calibración por diferencia de fase.

El método en sí, consiste en realizar mediciones de α' y β' en las inmediaciones de $P=0^\circ$ y 90° , calcular las funciones de fase de acuerdo a la ecuación (53a) y obtener la diferencia entre ambas.

$$\Phi(P) = \Theta(P) - \Theta(P + \pi/2) \quad (58a)$$

$$\Phi(P) = \frac{1}{2} \left[\tan^{-1} \left(\frac{\beta'}{\alpha'} \right)_P - \tan^{-1} \left(\frac{\beta'}{\alpha'} \right)_{P+\frac{\pi}{2}} \right] \quad (58b)$$

Para obtener P_s se ajusta una recta a $\Phi(P)$ y se calcula la intersección de ésta con el eje P . Así se obtiene del mismo modo que el método anterior (57c) y η puede determinarse de la función residual en $P=P_s$.

Por último, el método de regresión (Johs, 1993) supera muchos de los problemas asociados a los métodos de calibración previos. El aspecto clave de este método es que emplea expresiones exactas para modelar la respuesta del sistema óptico. Esto permite adquirir y analizar datos en cualquier acimut del polarizador y no sólo en la región donde $R(P)$ es aproximadamente parabólica.

Para implementar este método, primero se debe adquirir un conjunto de coeficientes (α', β') en un intervalo amplio ($\sim 90^\circ$) de ángulos del polarizador. A

estos coeficientes se les nombra $\alpha_{\text{exp}}(P)$ y $\beta_{\text{exp}}(P)$. Después, empleando las ecuaciones (43) a (46) se construye el modelo teórico de los coeficientes normalizados a partir del cual se realizará el ajuste de parámetros y se les nombra $\alpha_{\text{calc}}(P, \psi, \Delta, Ps, As, \eta)$ y $\beta_{\text{calc}}(P, \psi, \Delta, Ps, As, \eta)$. El objetivo de este método es minimizar la función de error χ^2 por optimización paramétrica utilizando el método de Levenberg-Marquardt.

$$\chi^2 = \sum_P \left\{ \left[\frac{\alpha_{\text{exp}}(P) - \alpha_{\text{calc}}(P, \psi, \Delta, Ps, As, \eta)}{\sigma_{\alpha_{\text{exp}}(P)}} \right]^2 + \left[\frac{\beta_{\text{exp}}(P) - \beta_{\text{calc}}(P, \psi, \Delta, Ps, As, \eta)}{\sigma_{\beta_{\text{exp}}(P)}} \right]^2 \right\} \quad (59)$$

Este método puede aplicarse sin importar ni el tipo de muestra ni el ángulo de incidencia.

Capítulo VI

Experimentos

Después de alinear el instrumento de acuerdo al procedimiento descrito en el Capítulo V, se procedió a la calibración mediante el método de regresión. La calibración se realizó en un ángulo de incidencia de 75° y en una longitud de onda de 500 nm sobre una muestra de aluminio en bulto. Se eligió aluminio porque tiene alta reflectancia tanto en p como en s y esto garantiza un buen nivel de señal en el detector en todo el intervalo de P . El modelo matemático utilizado para el ajuste es el que se obtuvo en el Capítulo IV y que comprende las ecuaciones (43) a (46).

Se realizaron mediciones de α' y β' en el intervalo de -45 a 45° de ángulo acimutal del polarizador (P), en incrementos de 0.9° . La adquisición se hizo con tiempo de integración de $200 \mu s$ y se promediaron 20 ciclos ópticos por punto. En la figura 33 se muestran las gráficas de α' y β' en función de P , junto con la mejor aproximación obtenida por el método de Levenberg-Marquardt (LM). Ambas gráficas muestran discontinuidades que se atribuyen a errores sistemáticos en la posición acimutal del analizador.

La optimización paramétrica se realizó para ambos conjuntos de datos experimentales partiendo del vector de parámetros iniciales w_0 .

$$w_0 = [\psi_0 \quad \Delta_0 \quad Ps_0 \quad As_0 \quad \eta_0] = [0.74 \quad 1.844 \quad -0.052 \quad 0.23 \quad 0.85]$$

El resultado del ajuste se muestra en la figura 33.

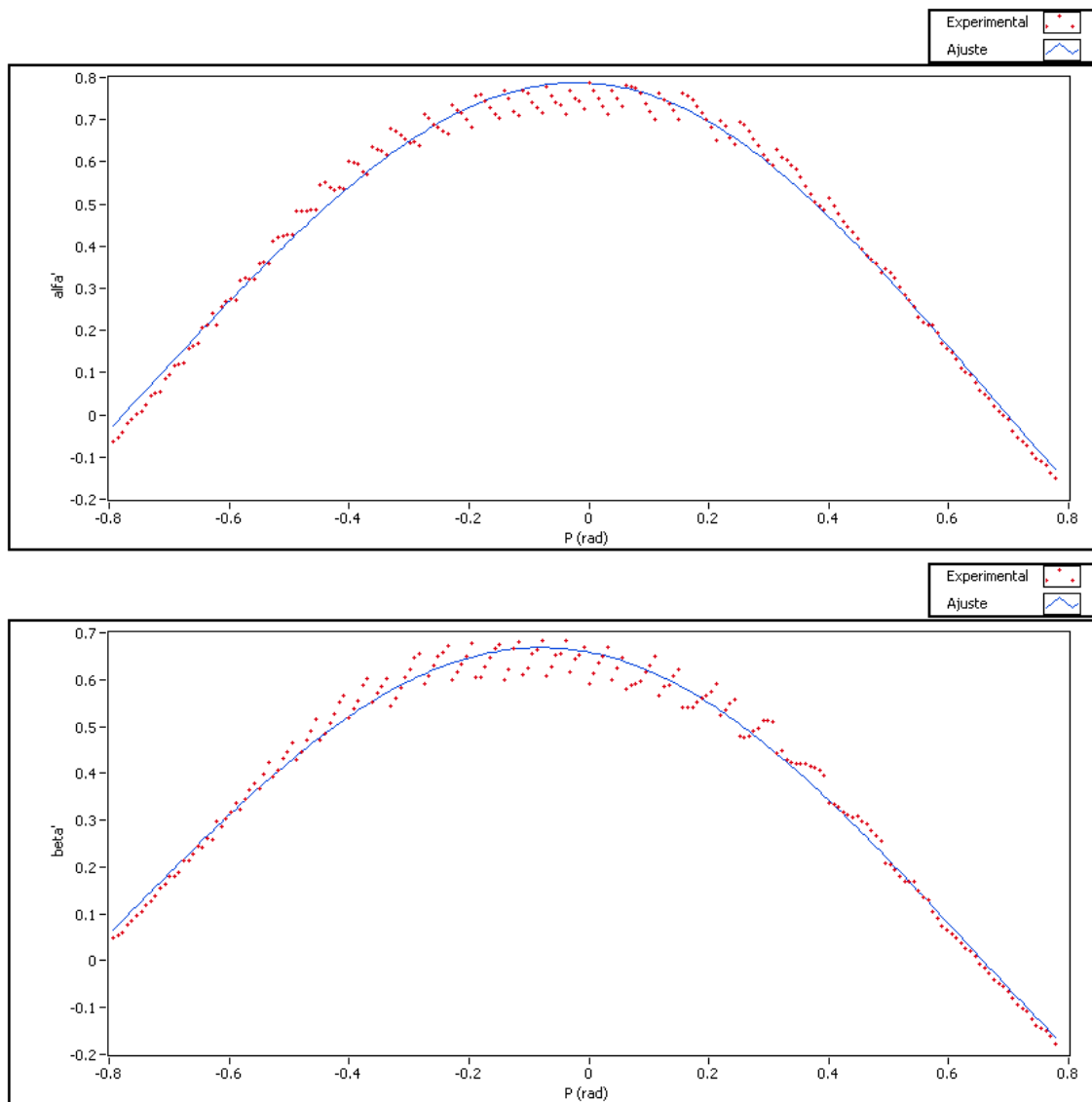


Figura 33. Ajuste paramétrico de α' y β' por LM.

Como se puede ver en la gráfica, el ajuste obtenido es bueno en ambas pendientes de las curvas y no tanto en los máximos, resultando en un residuo de 8.2443×10^{-4} para α' y de 6.3822×10^{-4} para β' y un error cuadrático medio (MSE) de 0.029 para α' y de 0.025 para β' . Sin embargo, lo preocupante es que los ajustes

convergen a diferentes valores de los parámetros, lo que indica que el modelo matemático empleado no es el adecuado.

$$w_{\alpha'} = [0.733 \quad 1.114 \quad 0.159 \quad 0.383 \quad 0.994]$$

$$w_{\beta'} = [0.748 \quad 1.79 \quad 0.0855 \quad 0.265 \quad 0.808]$$

Se modificó el modelo matemático del elipsómetro para incluir el error por sensibilidad dependiente de la polarización (PDS, por sus siglas en inglés). PDS es un error atribuible al detector que afecta generalmente a los elipsómetros de elemento rotatorio (Russev, 1989). El efecto de PDS se aplica al haz polarizado emergente del analizador.

El nuevo modelo se desarrolla matricialmente, de la misma forma que la ecuación (36) pero incluyendo la matriz de rotación inversa del analizador y las matrices que describen el efecto de PDS.

$$\vec{E}_{D_{PDS}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & F_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos F & \sin F \\ -\sin F & \cos F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A & -\sin A \\ \sin A & \cos A \end{bmatrix} \vec{E}_D \quad (60)$$

donde F_D es un número complejo y representa la relación entre los coeficientes del detector en \mathbf{p} y en \mathbf{s} , y F es el ángulo acimutal del detector respecto al plano de incidencia.

A partir de este modelo se obtienen nuevas expresiones para α' y β' que incluyen los parámetros de corrección de PDS, x_c y x_s .

$$\alpha' = \eta^{-1} [\alpha_{PDS} \cos 2As - \beta_{PDS} \sin 2As] \quad (61)$$

$$\beta' = \eta^{-1} [\alpha_{PDS} \sin 2As + \beta_{PDS} \cos 2As] \quad (62)$$

$$\alpha_{PDS} = \frac{\alpha + x_c}{1 + 0.5(\alpha x_c + \beta x_s)} \quad (63)$$

$$\beta_{PDS} = \frac{\beta + x_s}{1 + 0.5(\alpha x_c + \beta x_s)} \quad (64)$$

$$x_c = |F_D|^2 \cos 2F \quad (65)$$

$$x_s = |F_D|^2 \sin 2F \quad (66)$$

α y β son los mismos de las ecuaciones (45) y (46).

Utilizando este nuevo modelo matemático se realizó la optimización por LM sobre el mismo conjunto de datos experimentales y con un vector de parámetros iniciales al cual se agregan x_c y x_s .

$$\begin{aligned} w_0 &= [\psi \quad \Delta \quad Ps \quad As \quad \eta \quad x_c \quad x_s] \\ &= [0.74 \quad 1.844 \quad -0.052 \quad 0.23 \quad 0.85 \quad -0.0029 \quad -0.0027] \end{aligned}$$

El resultado se muestra en la figura 34.

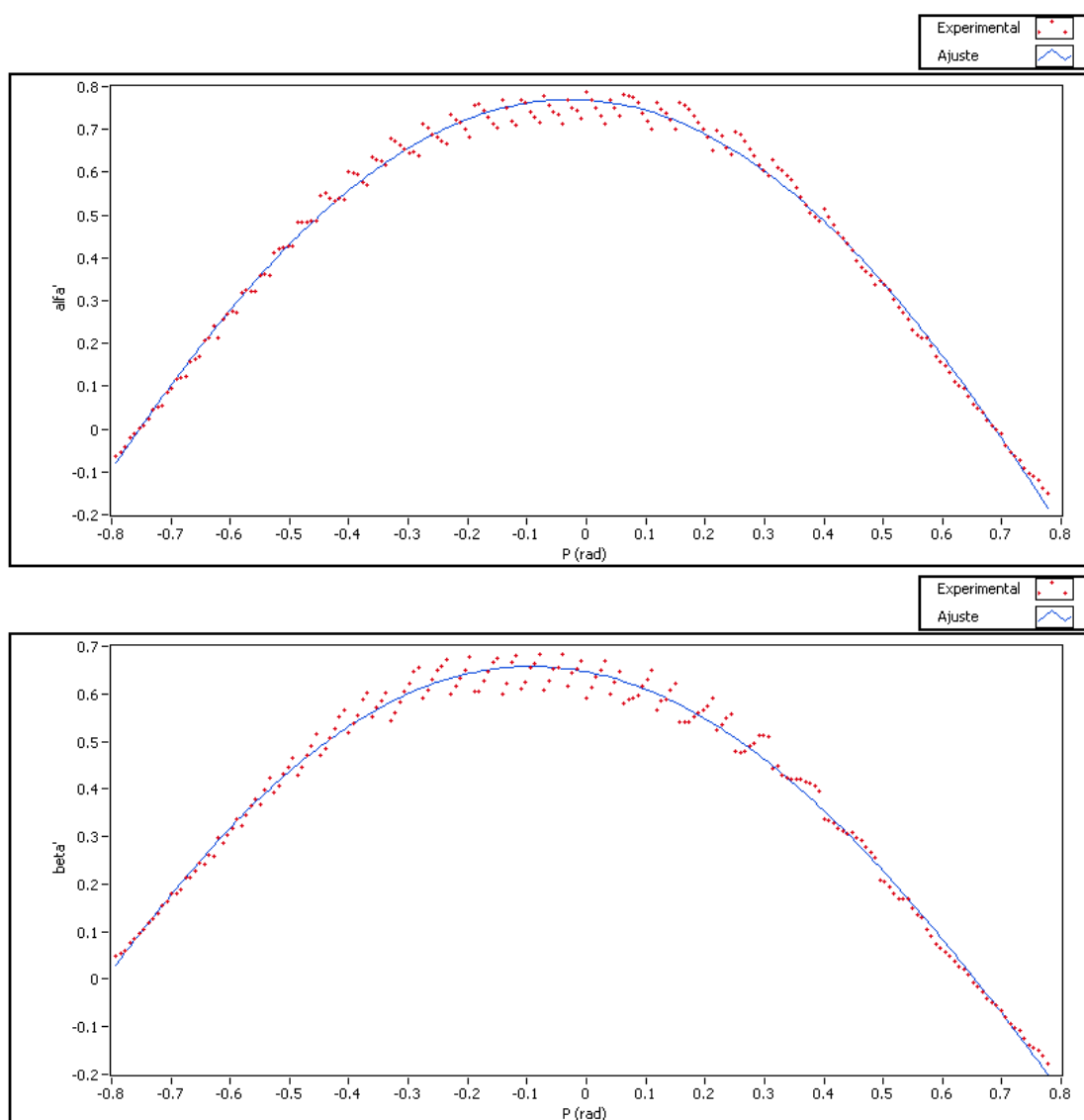


Figura 34. Ajuste paramétrico de α' y β' por LM con correcciones por PDS.

La inclusión de estos dos nuevos parámetros al modelo mejoró el ajuste de α' y β' en los máximos, resultando en un residuo de 4.8973×10^{-4} y un MSE de 2.25×10^{-2} para α' y un residuo de 4.9×10^{-4} y un MSE de 2.25×10^{-2} para β' . A pesar de la mejora en el ajuste, los parámetros de ambas curvas aún convergen hacia valores

diferentes, pues como se mencionó, los errores se atribuyen a defectos mecánicos del sistema.

Los vectores de parámetros que resultan del ajuste para α' y β' son los siguientes:

$$w_{\alpha'} = [0.8875 \quad 1.607 \quad -0.045 \quad 0.295 \quad 0.769 \quad -0.0968 \quad 0.336]$$

$$w_{\beta'} = [0.873 \quad 1.705 \quad 0.02 \quad 0.304 \quad 0.678 \quad -0.096 \quad -0.126]$$

A pesar de la inconsistencia en los parámetros de calibración obtenidos para α' y β' , se procedió a la medición de los parámetros elipsométricos (ψ , Δ) tomando un conjunto de parámetros a la vez.

En la figura 35 se muestra la grafica de ψ obtenida en nuestro elipsómetro con $w_{\alpha'}$, la obtenida con el elipsómetro M-88 de Woollam, y el error entre ambas.

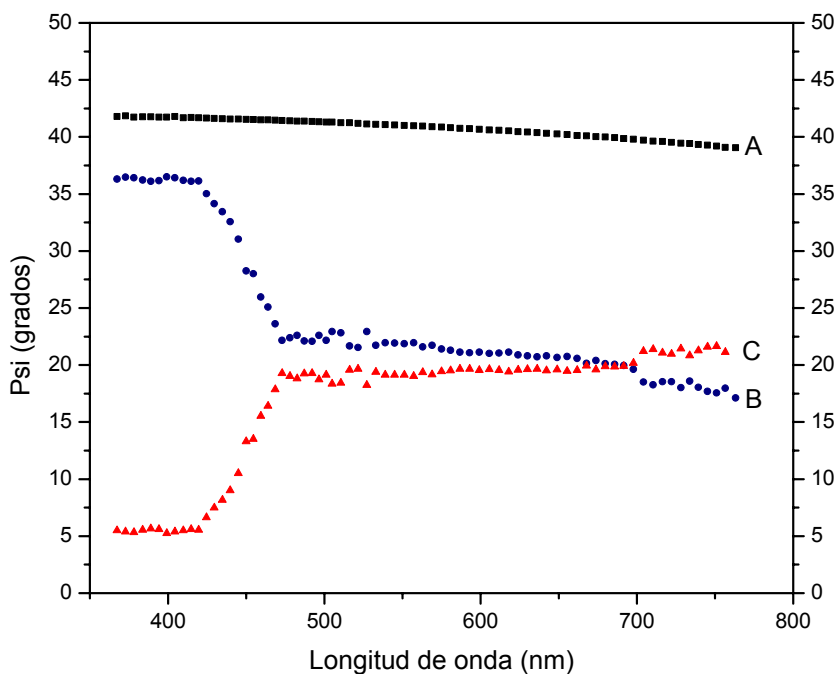


Figura 35. Gráfica comparativa de ψ obtenida con $w_{\alpha'}$. A) M-88, B) nuestro, C) error.

En la figura 36 se muestra la grafica de Δ obtenida en nuestro elipsómetro con los parámetros w_{α} , la obtenida con el elipsómetro M-88, y el error entre ambas.

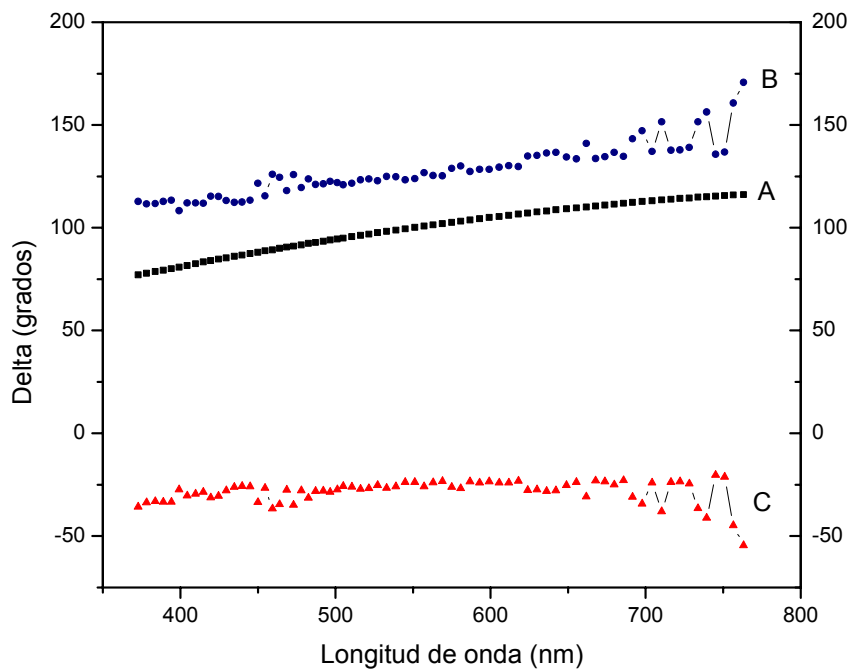


Figura 36. Gráfica comparativa de Δ obtenida con w_{α} . A) M-88, B) nuestro, C) error

Las curvas de ψ y Δ presentadas en las figuras 25 y 36 muestran una gran diferencia entre los datos obtenidos con ambos elipsómetros, aunque el comportamiento tiene similitud en un amplio intervalo de longitudes de onda (475—700 nm). Dentro del intervalo mencionado el error para ψ varía entre 20° y 22° , mientras que para Δ se mantiene aproximadamente constante en -25° .

En la figura 37 se muestra la grafica de ψ obtenida en nuestro elipsómetro con los parámetros w_{β} , la obtenida con el elipsómetro M-88 de Woollam, y el error entre ambas.

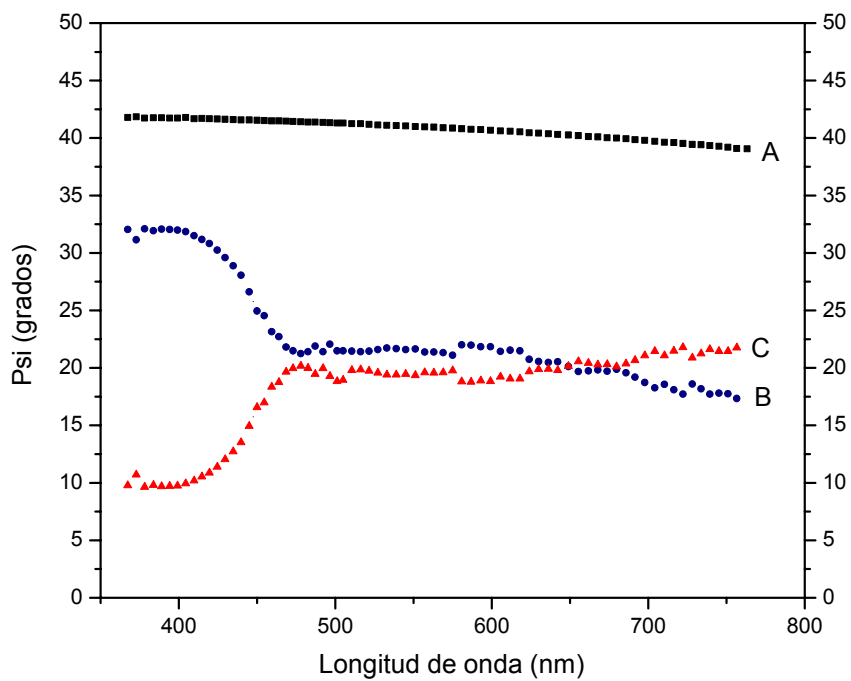


Figura 37. Gráfica comparativa de ψ obtenida con w_{β} . A) M-88, B) nuestro, C) error.

En la figura 38 se muestra la grafica de Δ obtenida en nuestro elipsómetro con los parámetros w_{β} , la obtenida con el elipsómetro M-88, y el error entre ambas.

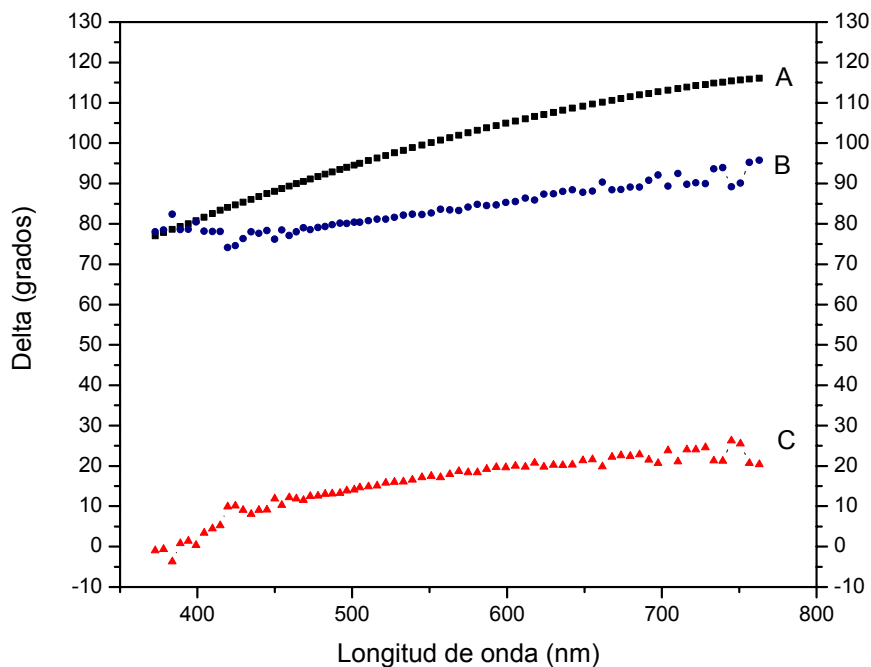


Figura 38. Gráfica comparativa de Δ obtenida con w_{β} . A) M-88, B) nuestro, C) error

Las curvas de ψ y Δ obtenidas con los parámetros w_{β} muestran, al igual que en el caso anterior, un comportamiento similar a las obtenidas con el M-88 en el intervalo de longitudes de onda de 475 a 700 nm. Dentro del intervalo mencionado el error para ψ varía entre 19° y 22° , mientras que para Δ varía entre 10° y 20° .

Capítulo VII

Análisis de resultados

En el intento por encontrar un mejor modelo del elipsómetro se ideó eliminar por un momento el efecto de la muestra y medir α' y β' en configuración directa. En esta configuración se desvanece la dependencia de ψ y Δ y el concepto de error acimutal del polarizador no se aplica, por lo tanto, al considerar la corrección del error por PDS los únicos parámetros que intervienen en el ajuste son x_c , x_s , As y η .

El modelo de esta configuración directa se obtiene por el desarrollo matricial de la ecuación (60) eliminando la matriz correspondiente a la muestra. De este modelo se encuentra que las expresiones de los coeficientes teóricos α y β dependen sólo de P .

$$\alpha = \cos 2P \quad (67)$$

$$\beta = \sin 2P \quad (68)$$

Para realizar este análisis se adquirieron mediciones de α' y β' en el intervalo de 0 a 720° del polarizador en incrementos de 0.9°, el tiempo de integración fue de 200 μ s y se promediaron 20 ciclos ópticos por punto.

En la figura 39 se muestran las gráficas de α' y β' en función de P , junto con la mejor aproximación obtenida por el método de LM para el modelo descrito por las ecuaciones (61) a (64), (67) y (68). El vector de parámetros iniciales es:

$$w_0 = [x_c \quad x_s \quad As \quad \eta] = [-0.002 \quad 0.002 \quad -0.08 \quad 0.85]$$

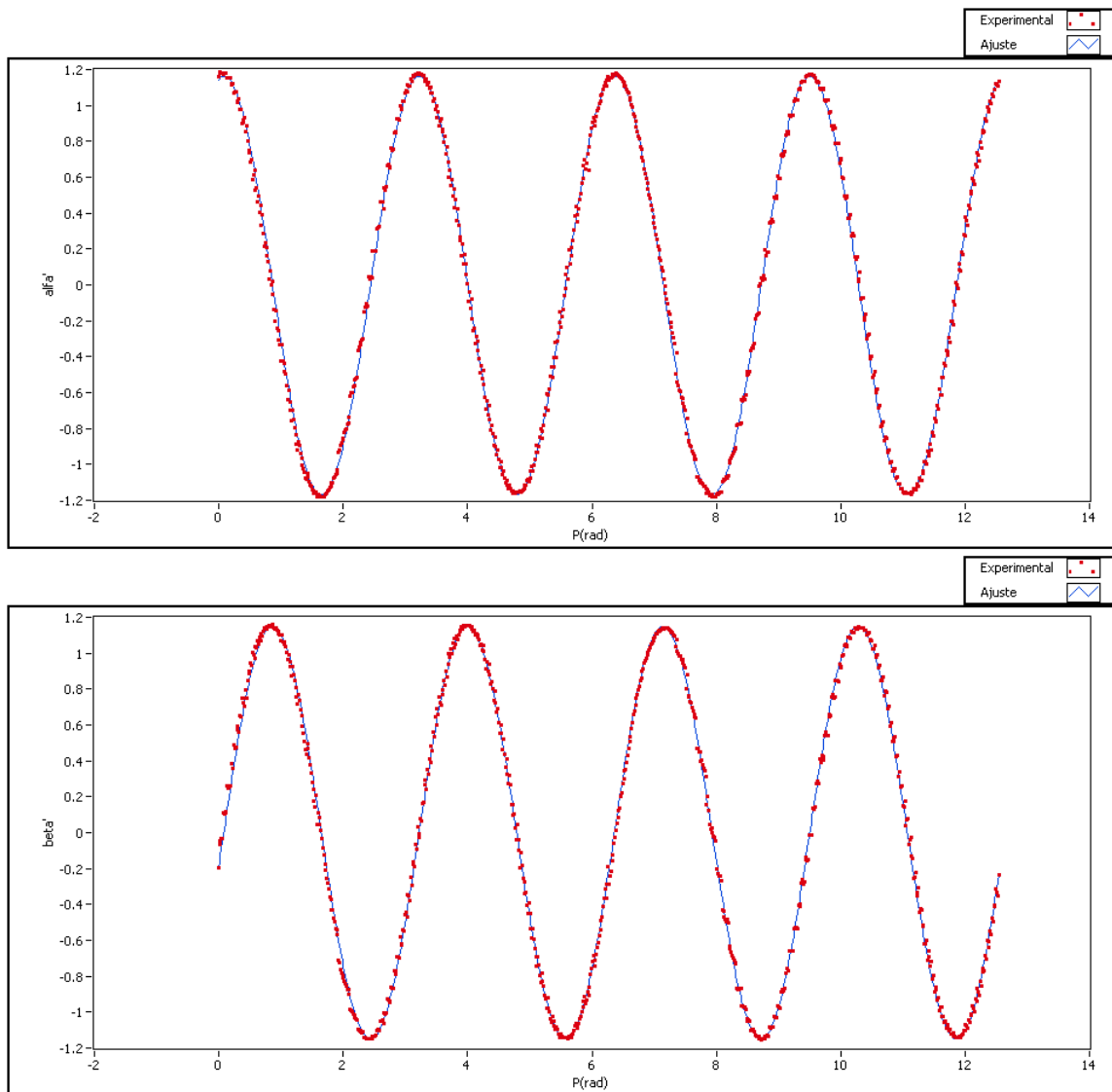


Figura 39. Ajuste paramétrico de α' y β' por LM. Configuración directa.

En la gráfica se observa un ajuste muy bueno que da como resultado los siguientes vectores de parámetros:

$$w_{\alpha'} = [-0.00295 \quad -0.00275 \quad -0.082 \quad 0.856]$$

$$w_{\beta'} = [-0.0124 \quad -0.0024 \quad -0.0786 \quad 0.87]$$

con residuo de 0.001478 y $MSE=0.03855$ para α' , y residuo de 0.001469 y $MSE=0.03842$ para β' .

A pesar de que el ajuste de las curvas es muy bueno, no proporciona suficiente información para modelar los errores de α' y β' . Para realizar un análisis más a fondo se calculó la TDF de ambas formas de onda (figura 40).

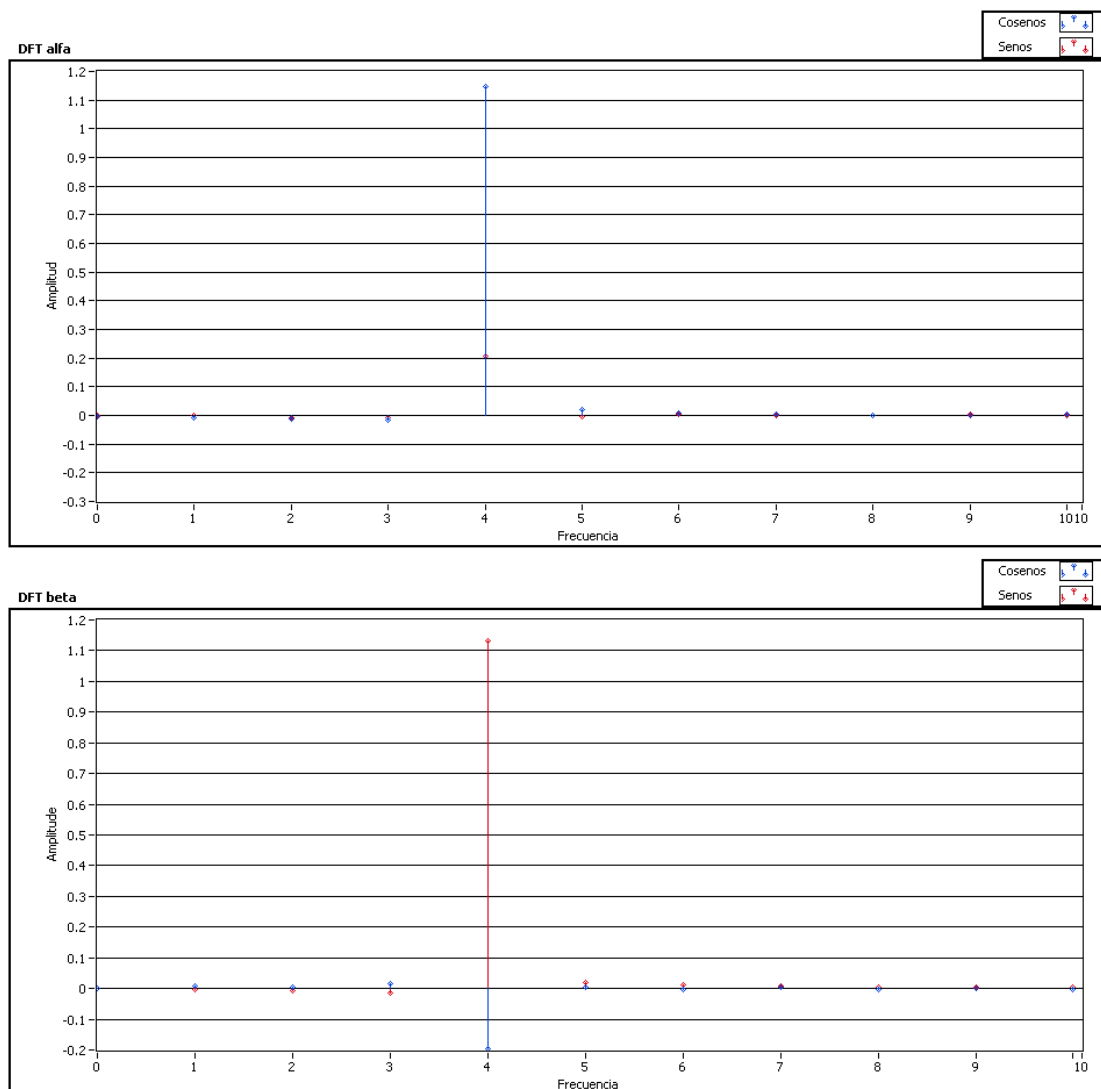


Figura 40. Principales componentes espectrales de α' y β' .

La TDF mostró que además de la frecuencia 2P existe una contribución significativa de las frecuencias 0 a 3.5P. En la figura 41 se muestran en escala ampliada los principales componentes espectrales de α' y β' .

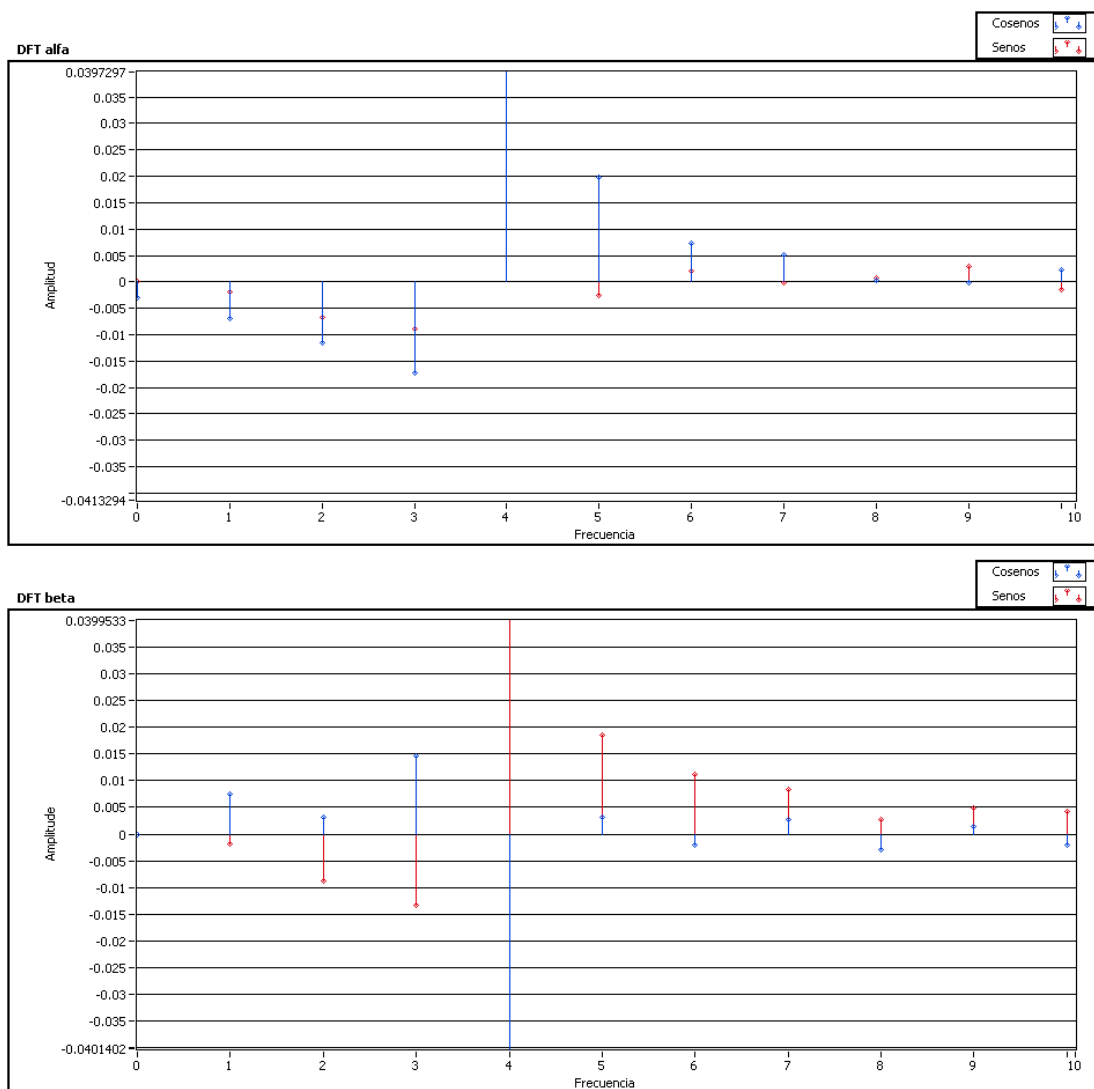


Figura 41. Ampliación de la TDF de α' y β' .

La frecuencia de cada componente se obtiene de $f_n = n \cdot f_s / N$, donde n es el n -ésimo componente, f_s es la frecuencia de muestreo y N es el número total de muestras (Brigham, 1988).

De acuerdo a la literatura (Aspnes y Studna, 1975), las componentes de frecuencia diferentes a $2P$ que aparecen en la señal de irradiancia pueden ser atribuidas a errores mecánicos y de alineación. Utilizando este argumento, se modelaron las discontinuidades de α' y β' como resultado de pequeñas variaciones en el plano de incidencia causadas por la combinación de una mancha de luz no homogénea y la deflexión del haz en el polarizador producto de los errores mecánicos de la montura giratoria. El resultado fue una matriz del polarizador con su coeficiente de transmisión diferente de 1.

$$polarizador = \begin{bmatrix} c + d \sin(P + \theta) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (69)$$

Esta matriz modela una variación sinusoidal en la intensidad del campo eléctrico en función del acimut del polarizador. Al sustituir la ecuación (69) por la matriz del polarizador en (36) y realizar los cálculos se encontró que este modelo por sí solo no soluciona las inconsistencias, puesto que los coeficientes α' y β' se miden con P fijo y además son normalizados, lo que significa que las variaciones de campo eléctrico en función de P forman parte de la proporcionalidad de la irradiancia (11).

Continuando con este mismo razonamiento los errores mecánicos en la montura del analizador se modelan mediante (70) y el siguiente paso lógico es sustituir (69) y (70) por las matrices correspondientes en (36), lo cual da más sentido a la idea, puesto que de esta forma se están modelando los errores en ambas monturas. El desarrollo matricial de (36) con las sustituciones mencionadas no se ha realizado aún.

$$analizador = \begin{bmatrix} e + f \sin(A + \phi) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (70)$$

Capítulo VIII

Conclusión

El modelo matemático (del elipsómetro) propuesto en un inicio se hizo bajo la suposición de que se cumplían varias condiciones ideales, sin embargo, lo irreal de estas suposiciones aunado a los errores tanto de diseño como de construcción degeneraron el modelo inicial invalidando las relaciones entre los coeficientes experimentales y los teóricos. Se trabajó en construir un modelo más realista que incluyera los errores identificados, pero no se ha podido hasta ahora encontrar un modelo satisfactorio.

Comparando los resultados obtenidos para ψ y Δ con nuestro elipsómetro y con el comercial (M-88) se encontró una diferencia muy grande en los valores, aunque existe un intervalo (475—700 m) en el cual el comportamiento es muy similar. Los errores se atribuyen, en parte, a la respuesta del detector con tiempos de integración tan cortos, pero principalmente a cuestiones mecánicas que afectan la determinación de los coeficientes α' y β' (como la resolución angular y la velocidad de giro del analizador).

Otro factor importante que afecta el desempeño del elipsómetro es el tiempo de adquisición relativamente grande del espectrómetro, puesto que obliga a trabajar a una frecuencia mecánica muy baja del analizador. Si bien este factor no representa un problema significativo para mediciones estáticas, sí afecta el desempeño en aplicaciones dinámicas ya que reduce notablemente la resolución temporal del instrumento.

Teóricamente se puede adquirir un par de valores ψ y Δ aproximadamente cada segundo, pero si se promedian varios ciclos ópticos para mejorar la tasa de señal a ruido el tiempo necesario para adquirir los parámetros se incrementa. Esto limita el empleo del instrumento a procesos de depósito (de películas delgadas) lentos.

Aunque no se logró el objetivo principal de este trabajo de tesis se puede asegurar que se obtuvieron conocimientos y experiencia en el tema que me permitirán en un corto plazo identificar bien y minimizar las fuentes de error, y a mediano plazo, modelarlas e incluirlas en las ecuaciones que relacionan los coeficientes teóricos y experimentales para llevar este proyecto a una buena conclusión.

Literatura citada

Aspnes, D. E., y A. A. Studna. 1975. High precision scanning ellipsometer. *Applied Optics*, 14(1): 220—228.

Brigham, E. O. 1988. *The fast Fourier transform and its applications*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. 448 pp.

Collins, R. W. 1990. Automatic rotating element ellipsometers: calibration, operation, and real-time applications. *Review of Scientific Instruments*, 61(8):2029—2062.

Collins, R. W., Ilsin A. y Chi C. 2005. Rotating polarizer and analyzer ellipsometry. En: Harland G. T., Eugene A. I. (ed.). *Handbook of ellipsometry*. William Andrew Publishing. Norwich, NY. 103 pp.

de Nijs, J. M. M., A. H. M. Holtstag, A. Hoeksta, y A. Silfhout. 1988. Calibration method for rotating-analyzer ellipsometers. *Journal of the Optical Society of America A*, 5(9):1466—1471.

Fujiwara, H. 2007. *Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*. John Wiley & Sons Ltd. West Sussex, England. 369 pp.

Hecht, E. 2002. *Optics*. Addison Wesley. Cuarta edición. San Francisco, CA. 703 pp.

Humlíček, J. 2005. Polarized light and ellipsometry. En: Harland G. T., Eugene A. I. (ed.). *Handbook of ellipsometry*. William Andrew Publishing. Norwich, NY. 89 pp.

Ilsin, A., Y. M. Li, H. V. Nguyen, y R. W. Collins. 1992. Spectroscopic ellipsometry on the millisecond time scale for real-time investigations of thin-film and surface phenomena. *Review of Scientific Instruments*, 63 (8):.3842—3848.

J. A. Woollam Co., Inc.1997. *A short course in ellipsometry*. Manual del programa WVASE32.

Johs, B. 1993. Regression calibration method for rotating element ellipsometers. *Thin Solid Films*, 234: 395—398.

Kim, Y. T., R. W. Collins y K. Vedam. 1990. Fast scanning spectroelectrochemical ellipsometry: in situ characterization of gold oxide. *Surface Science*, 233: 341—350.

Lyons, R. G. 1977. *Understanding digital signal processing*. Prentice Hall. New Jersey. 517 pp.

Muller, R. H. y J. C. Farmer. 1984. Fast, self compensating spectral-scanning ellipsometer. *Review of scientific instruments*, 55(3): 371—374.

Russev, S. H. 1989. Correction for nonlinearity and polarization dependent sensitivity in the detection system of rotating analyzer ellipsometers. *Applied Optics*, 28(8):1504—1507.

Apéndice A

Especificaciones de los componentes

A.1 Componentes ópticos

Polarizador/Analizador

Polarizadores de calcita tipo Glan-Thompson.

Modelo 03-PTO-001 de Melles-Griot.

Coefficiente de extinción: $10^5:1$

Diámetro (ϕ): 25mm

Longitud (L): 22.2mm

Apertura (CA): 10mmx10mm

Intervalo de longitud de onda: 350—2300nm

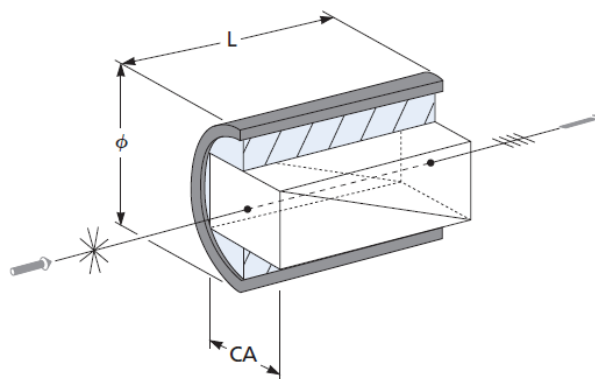


Figura 42. Dimensiones y eje de transmisión del polarizador.

Colimador

Espejo parabólico de aluminio 90° fuera de eje.

Modelo **NT47-095** de Edmund Optics.

Diámetro: 25.4mm

Distancia focal principal (PFL): 12.7mm

Distancia focal efectiva (EFL): 25.4mm

Desplazamiento en Y: 25.4mm

Recubrimiento: aluminio protegido.

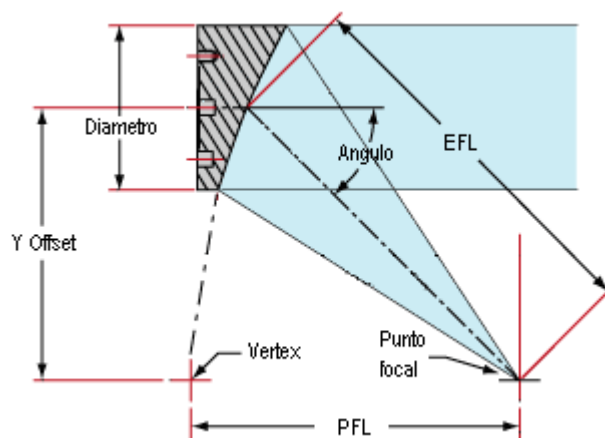


Figura 43. Diagrama del espejo colimador.

Fibras ópticas

En este proyecto se utilizan dos fibras ópticas, una que guía la luz de la fuente al módulo de polarización (fibra A) y otra que la lleva del módulo de detección al espectrómetro (fibra B).

La fibra A es del modelo **FOP1-ST** de World Precision Instruments con intervalo espectral de 350—1000 nm y 1 mm de diámetro del núcleo.

La fibra B es un modelo **NT58-456** de Edmund Optics con las siguientes especificaciones:

Intervalo de longitud de onda: UV/Visible

Diámetro del núcleo: 400 μ m

Diámetro del revestimiento: 440 μ m

Diámetro de la fibra: 470 μ m

Apertura numérica: 0.22 \pm 0.02

Índice de refracción del núcleo (n_1): 1.458

Índice de refracción del revestimiento (n_2): 1.441

A.2 Detector

El detector es un CCD lineal (Toshiba TCD1304AP) con 3648 pixeles de 8 μ m x 200 μ m. Este CCD está integrado en un espectrómetro comercial modelo HR4000 de Ocean Optics con las siguientes características:

Tasa de digitalización de pixel: 1MHz.

Resolución analógico/digital: 14 bits.

Relación de señal a ruido: 300:1

Tiempo de integración mínimo: 3.8ms.

Intervalo de longitudes de onda: 370—820 nm.

Interfaz de comunicación: USB 2.0 (480 Mbps)

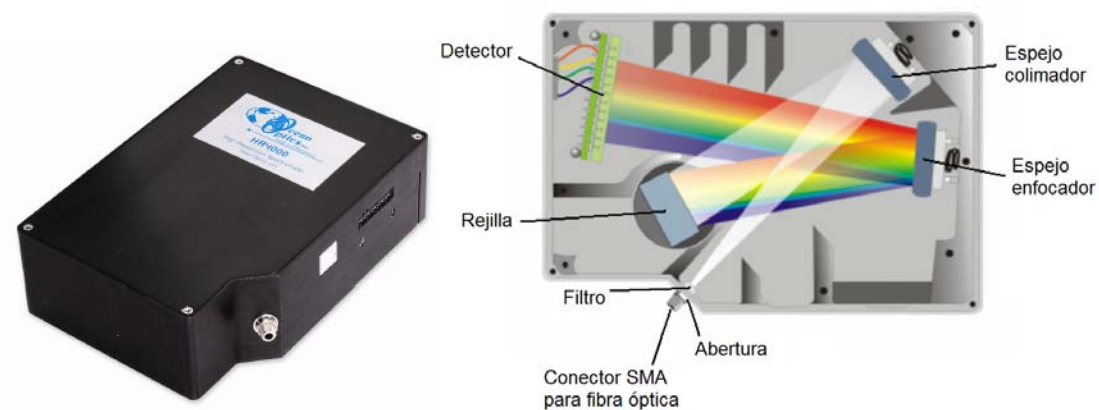


Figura 44. Espectrómetro HR4000.

A.3 Motores

Motores de pasos modelo KP35FM2-044 de Japan Servo Co.

Bipolares (2 fases)

24 Vdc

1.8° por paso

Par: 700g-cm



Figura 45. Motor de pasos

A.4 Manejador de motores

Es el circuito integrado A3967 de Allegro diseñado para manejar motores de pasos bipolares generando movimiento a pasos completos, medios, cuartos y octavos de paso. Posee salidas con capacidad de hasta 30V y $\pm 750\text{mA}$. Mediante las entradas de control (compatibles con TTL) se pueden programar la dirección de giro, el tamaño de paso, habilitar la salida y generar el movimiento.

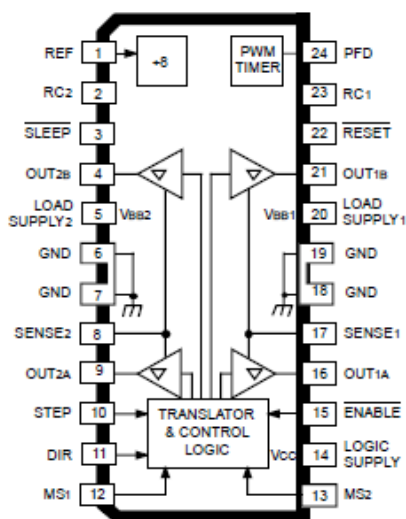


Figura 46. Manejador de motores A3967.

Las señales de control y su función se muestran en las tablas IV y V.

Tabla IV. Señales de control del manejador de motores.

SEÑAL	FUNCIÓN
STEP	La transición de bajo a alto genera que el motor avance un incremento. El tamaño del incremento se determina mediante las señales MS1 y MS2 como se muestra en la tabla IV.
DIR	Determina la dirección de giro del motor.
/RESET	Pone el manejador en un estado predefinido e inhabilita las salidas
/SLEEP	Pone el manejador en un estado de bajo consumo de energía
/ENABLE	Inhabilita todas las salidas

Tabla V. Señales para programar el tamaño del paso.

MS1	MS2	PASO
0	0	1
1	0	$\frac{1}{2}$
0	1	$\frac{1}{4}$
1	1	$\frac{1}{8}$

A.5 Tarjeta de adquisición

Es la tarjeta de adquisición de datos multifuncional modelo NI PCI-6035E de National Instruments. Cuenta con los siguientes recursos:

16 Entradas analógicas (8 diferenciales) de 16 bits de resolución a 200 kS/s.

2 salidas analógicas de 12 bits de resolución a 10kS/s.

8 líneas digitales de entrada/salida compatibles con TTL.

2 temporizadores/contadores de 24 bits de resolución

Manejadores para LabVIEW.

A.6 La fuente de luz

Se utiliza la lámpara de arco de xenón Hamamatsu de 75 W modelo L2174 con fuente reguladora de corriente y circuito de ignición Hamamatsu modelo C2903-01.



Figura 47. Lámpara de Xenón.

Apéndice B

Diseño de circuitos electrónicos

B.1 El manejador de motores

Para la operación de los motores (polarizador y analizador) se diseñó un circuito con dos manejadores A3967 controlados por medio de las líneas digitales de la tarjeta PCI-6035E. Se emplean 2 salidas digitales (DIR y /EN) para la programación de cada manejador. Con el propósito de proteger la tarjeta de adquisición se aislaron eléctricamente las líneas digitales utilizando optoacopladores.

Las líneas de control restantes del manejador de motores (RESET, SLEEP, MS1 y MS2) se mantienen en estados lógicos fijos por no ser necesaria su modificación durante la operación del programa.

/RESET=1;

/SLEEP=1;

MS1=0

MS2=1

La señal STEP del analizador (PASO_A) se genera internamente con uno de los contadores de la tarjeta de adquisición y se alimenta al manejador A3967 a través de un optoacoplador H1L1M. La señal STEP del polarizador (PASO_P) se genera por medio de un canal digital y se alimenta al manejador A3967 empleando un optoacoplador 4N25.

El estado actual del circuito de control de motores se muestra en el siguiente diagrama esquemático.

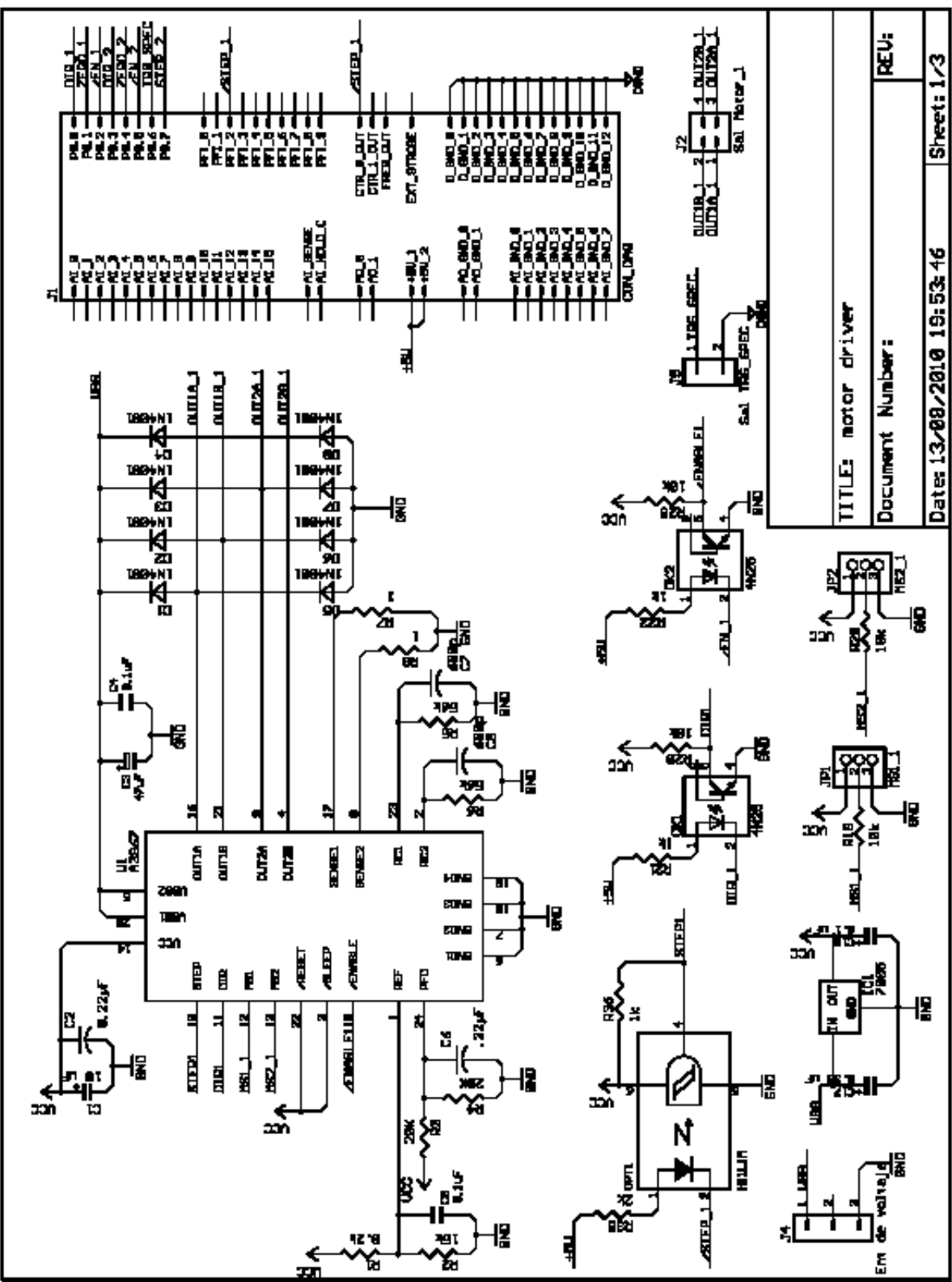
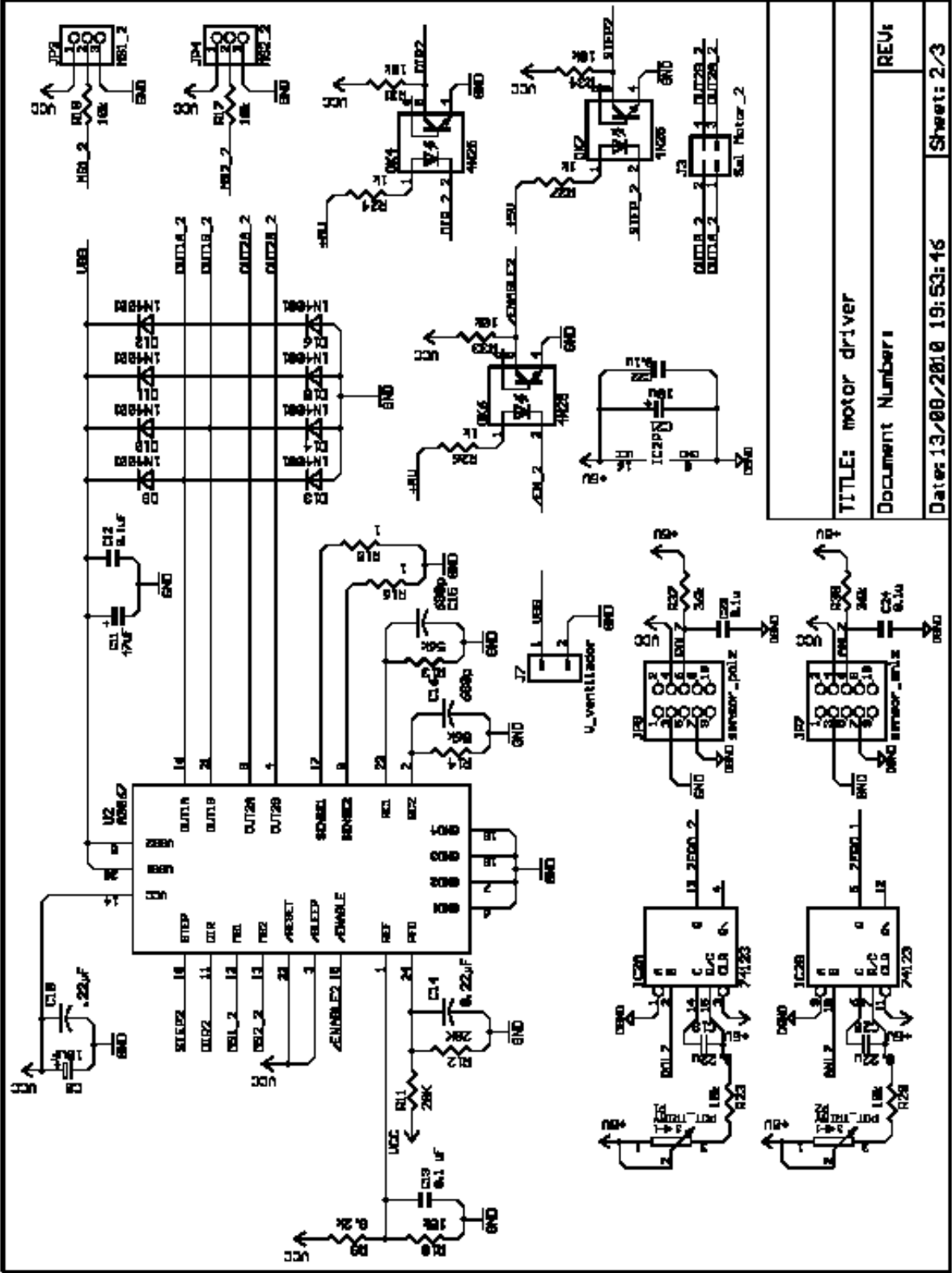


Figura 48a. Diagrama del circuito manejador de motores (parte 1).

TITLE: motor driver
Document Number:
REU:
Dates: 13/08/2010 19:53:46
Sheet: 1/3



TITLE: motor driver
Document Number:1
REV:1
Date:13/08/2010 19:53:16
Sheet: 2/3

Figura 48b. Diagrama del circuito manejador de motores (parte 2).

B.2 La sincronización

Como se mencionó en el Capítulo IV, la forma de sincronizar la adquisición de muestras fue instalar sensores ópticos en el polarizador y el analizador para establecer una referencia de inicio. El sensor utilizado QRE1113GR de Fairchild Semiconductors es de reflexión con salida de fototransistor.

El circuito de detección se muestra en el siguiente diagrama.

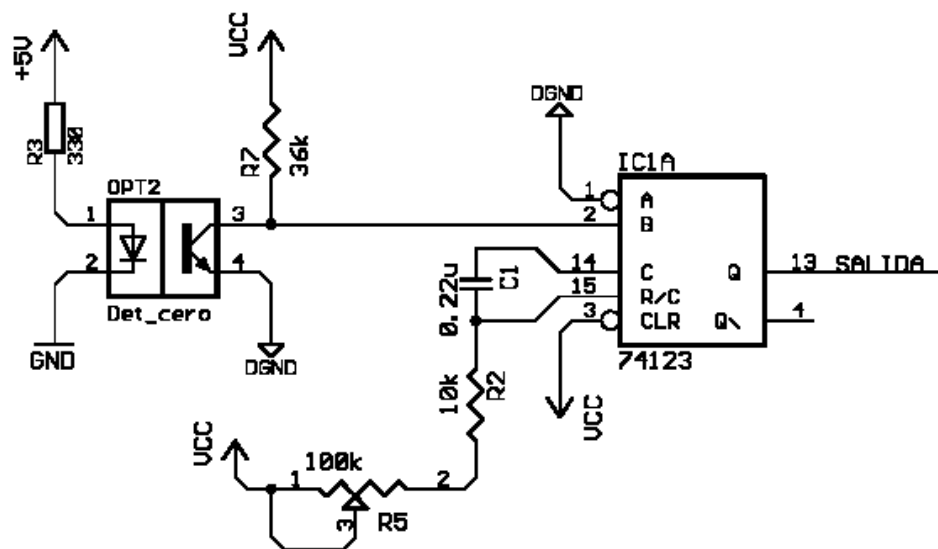


Figura 49. Diagrama del circuito detector del cero mecánico del polarizador y el analizador.

Las entradas digitales de la tarjeta se conectan directamente a la salida del generador de pulso (74123). R5 permite variar la duración del pulso.

Apéndice C

Diseño de monturas mecánicas

C.1 Los soportes principales.

Son un par de soportes que poseen una plataforma de inclinación variable y que permiten fijar el ángulo de incidencia del haz de prueba. El intervalo de variación del ángulo va de 90° a 60° en decrementos de 5° .

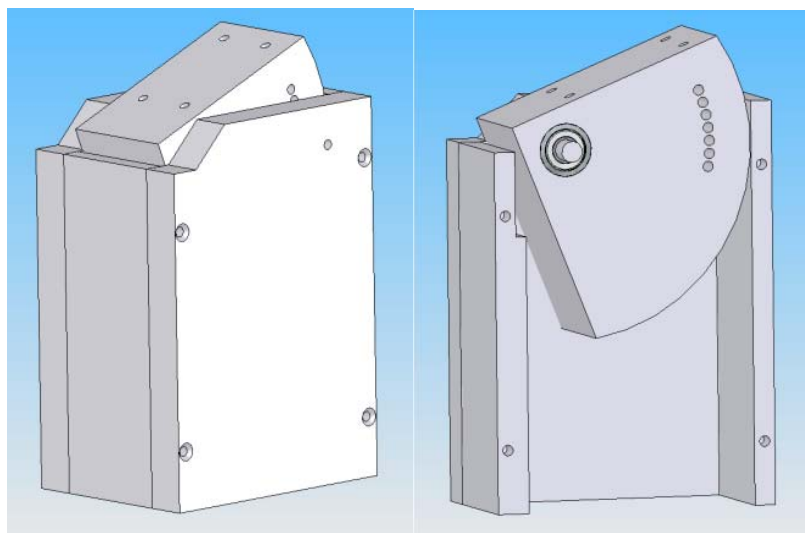


Figura 50. Soporte principal.

C.2 Las plataformas para la alineación.

Son mecanismos de ajuste basados en resortes de extensión y tornillos de rosca fina. Fueron diseñados para ajustar la inclinación de los módulos de polarización y detección durante la alineación directa del sistema.

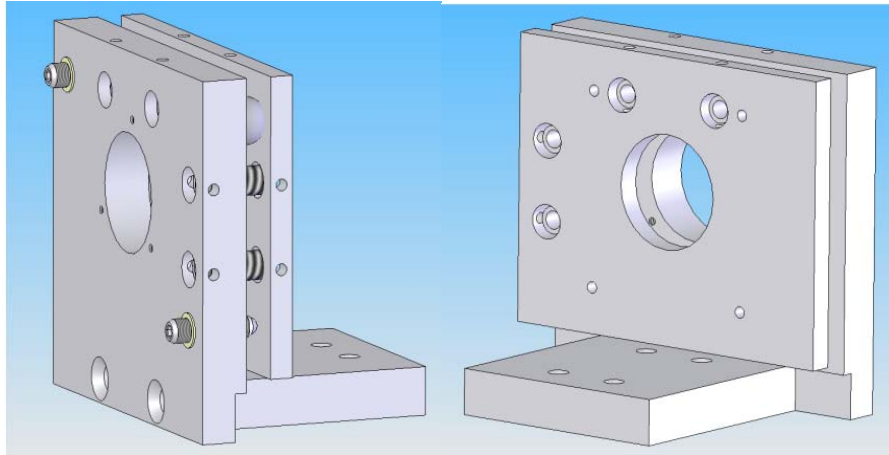


Figura 51. Plataforma para alineación.

C.3 El montaje giratorio del polarizador/analizador.

Como se mencionó en el Capítulo III, este mecanismo fue diseñado para dotar del movimiento giratorio al polarizador y al analizador. Consta de una base fija, un cilindro que sujeta el polarizador y un balero.

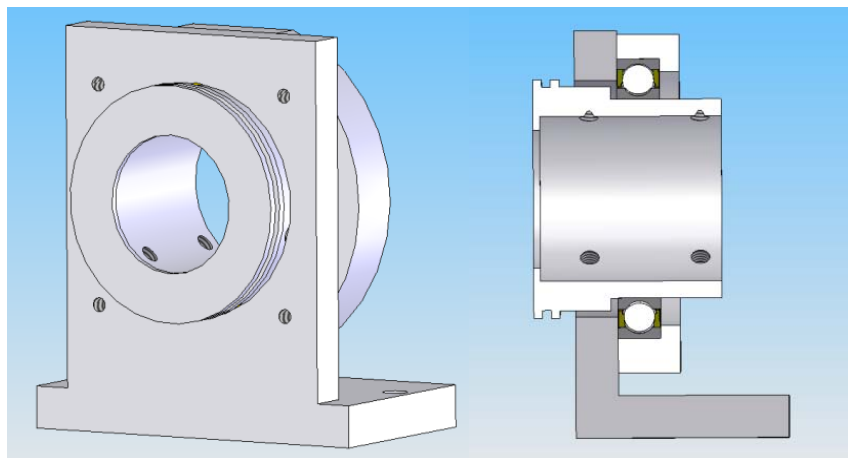


Figura 52. Montaje giratorio del polarizador/analizador.

C.4 El módulo de polarización.

Contiene el espejo colimador y el mecanismo de giro del polarizador. Este módulo es el encargado de producir el estado de polarización del haz de prueba. Recibe luz blanca en la entrada y entrega luz linealmente polarizada en un ángulo fijo de trabajo.

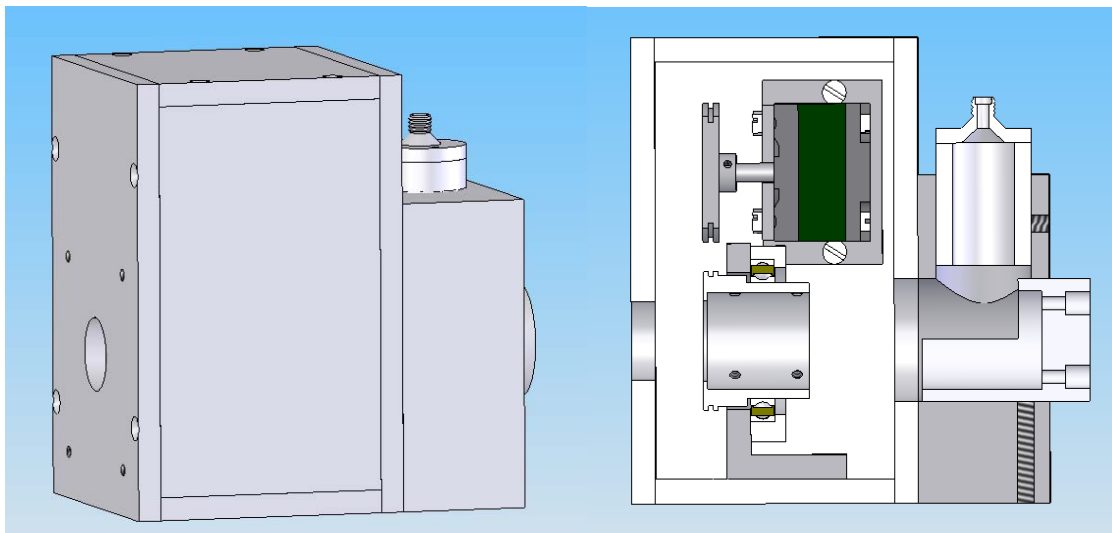


Figura 53. Módulo de polarización.

C.5 El módulo de detección.

Contiene el mecanismo de giro del analizador. Recibe la luz reflejada por la muestra (elípticamente polarizada) y entrega al detector un haz cuya intensidad varía sinusoidalmente a dos veces la frecuencia mecánica de giro del analizador.

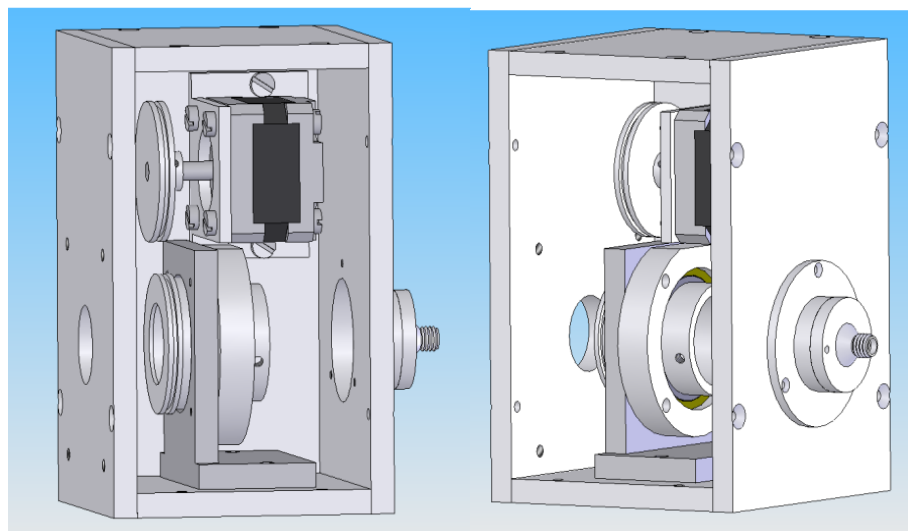


Figura 54. Módulo de detección.

C.6 La plataforma de la muestra.

Permite ajustar la altura e inclinación de la muestra durante la alineación normal. Posee un mecanismo similar al de las plataformas de ajuste.

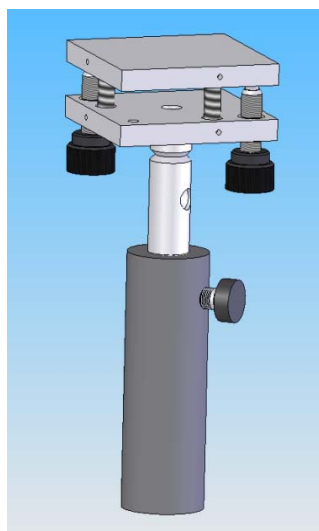


Figura 55. Plataforma para alineación de la muestra.

C.7 La estación completa.

En la siguiente figura se muestra la estación de medición sin la fuente de luz ni el detector.

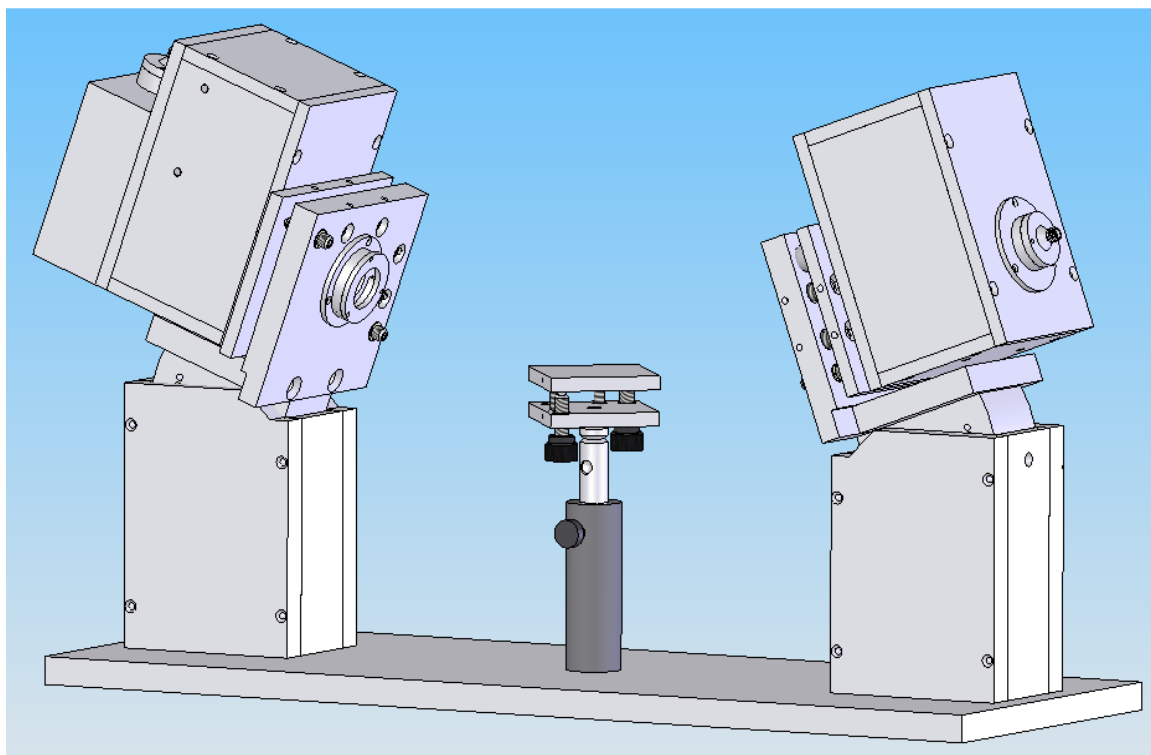


Figura 56. Estación para mediciones estáticas.

Apéndice D

El programa de operación

Desde este panel virtual (figura 57) se inicia y controla la ejecución del programa y se muestran los resultados. Los botones virtuales de la parte central superior permiten seleccionar el tipo de medición y elegir secuencialmente las rutinas de operación. Posee campos donde el usuario puede modificar el tiempo de integración, la longitud de onda y el número de ciclos ópticos por promediar.

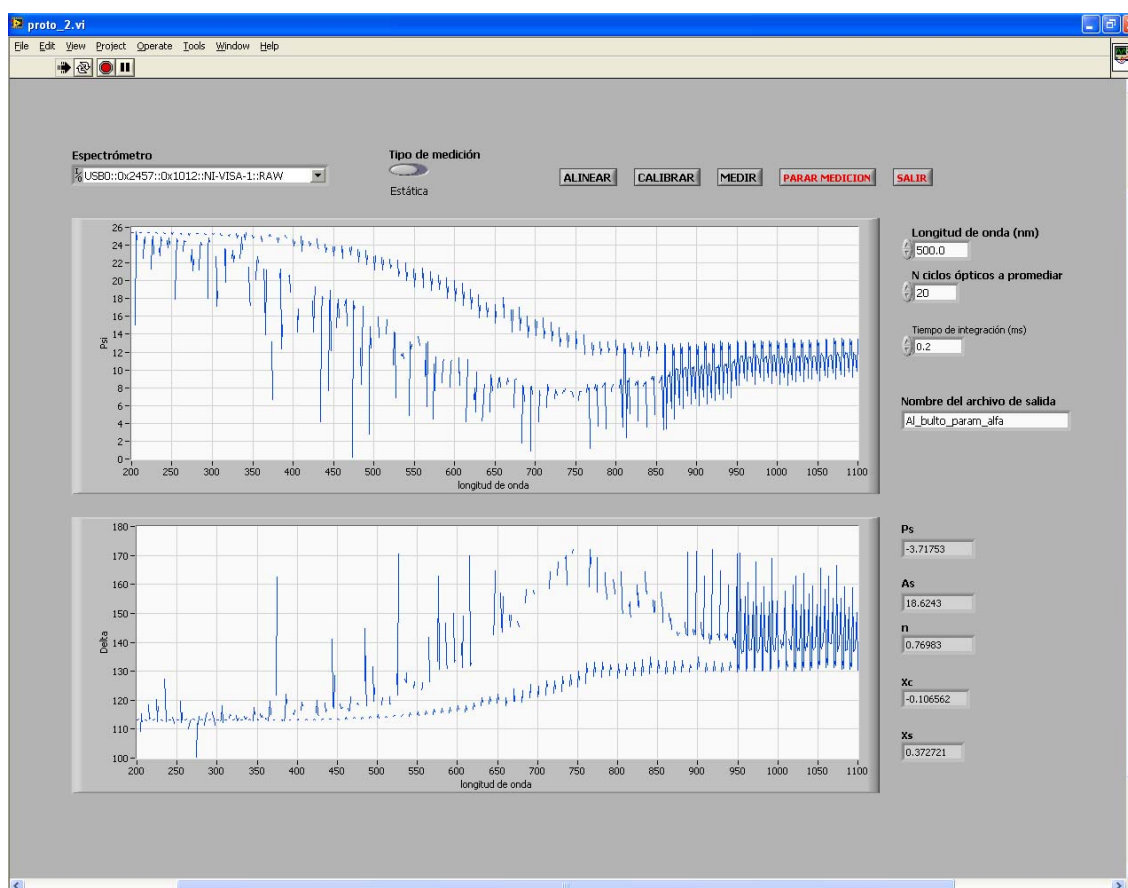


Figura 57. Panel principal del programa de operación.

El panel de alineación sólo muestra dos gráficas. En la gráfica superior se despliega el espectro adquirido (Irradiancia vs λ). En la gráfica inferior se despliega la irradiancia en función del tiempo para la longitud de onda elegida.

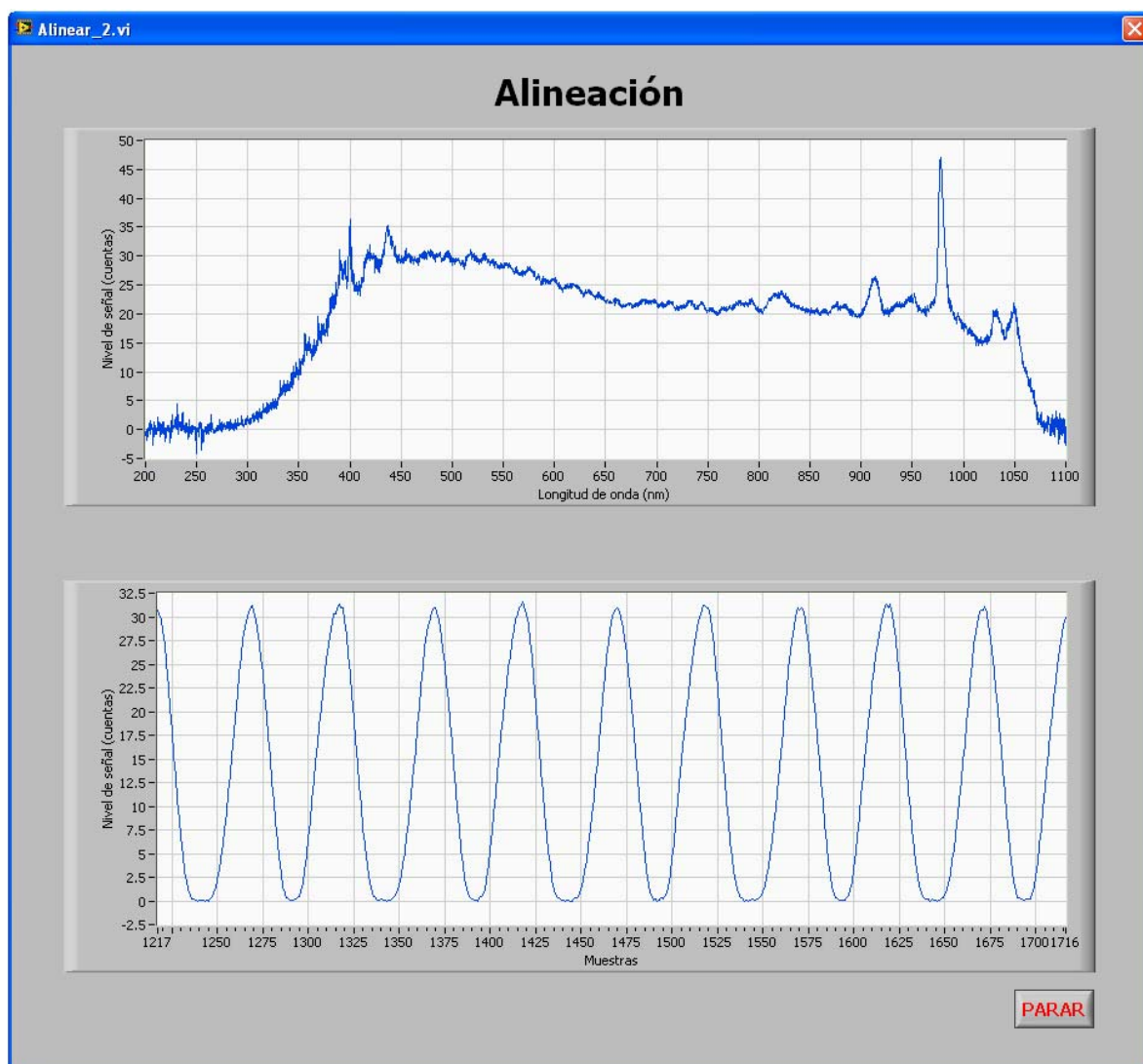


Figura 58. Panel de alineación.

El panel de calibración muestra dos gráficas donde se despliegan los valores de α' y β' , en función de P, junto con la función de ajuste respectiva. También tiene indicadores donde se muestra los parámetros de calibración obtenidos.

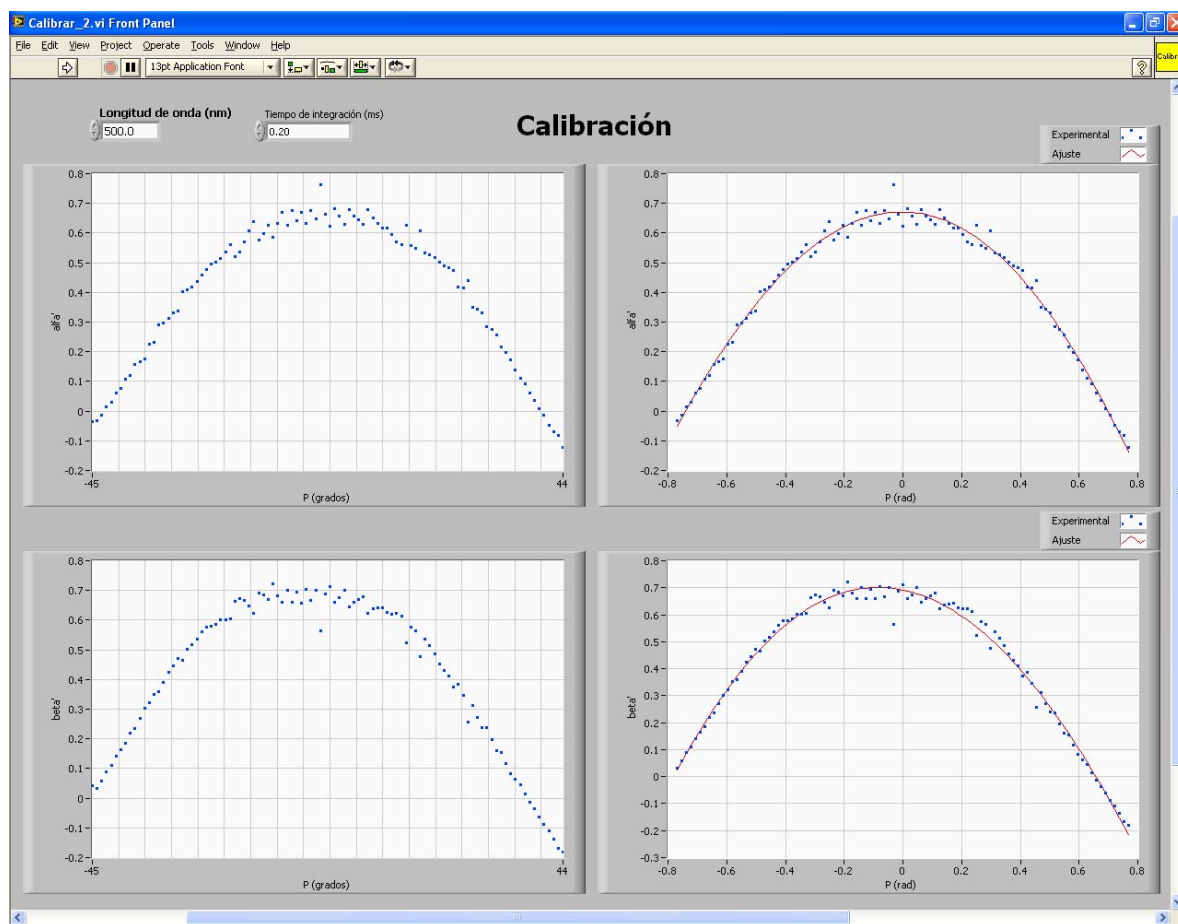


Figura 59. Panel de calibración.