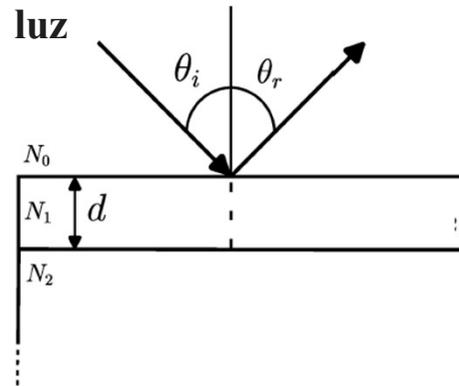
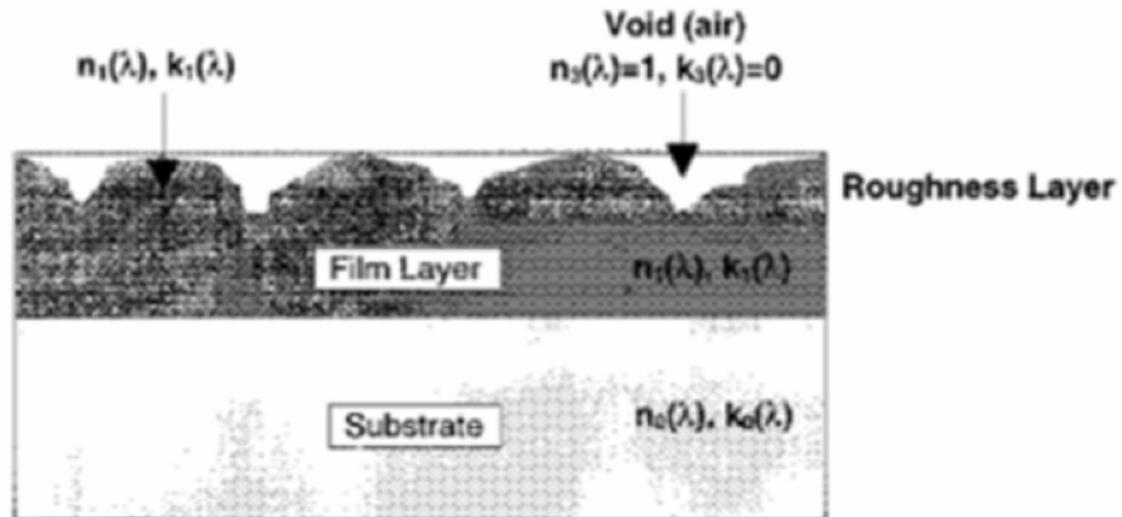


POLARIZACIÓN DE LA LUZ Y ELIPSOMETRIA



- La elipsometría es una herramienta para estudiar propiedades ópticas de materiales y de superficies.
- Se basa en la medición del cambio en el estado de polarización de la luz tras la interacción con la muestra en estudio.
- Se pueden determinar, por ejemplo: espesor de una película, índice de refracción, rugosidad de una superficie

En un típico caso de una muestra constituida por una película fina depositada sobre un sustrato, la elipsometría permite determinar el espesor del “film layer”, los parámetros de su rugosidad y el índice de refracción (parte real y parte compleja) del sistema film+sustrato

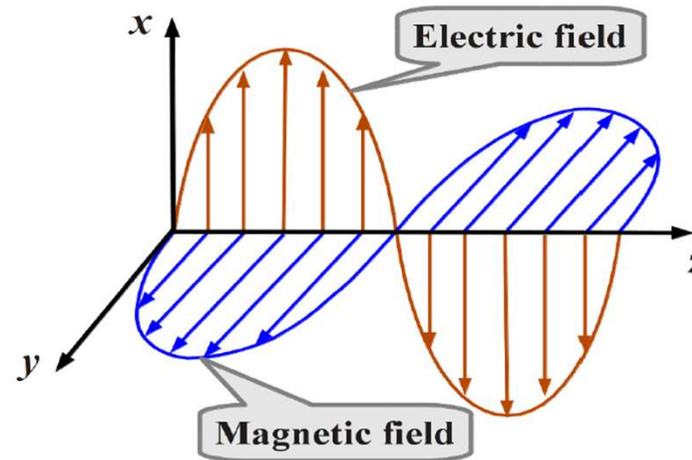


Esquema:

- Polarización de la luz
- Como medir la polarización de la luz
- El instrumento
- Medidas realizadas con un elipsometro

La polarización de la luz

es la dirección del campo eléctrico de la onda electromagnética



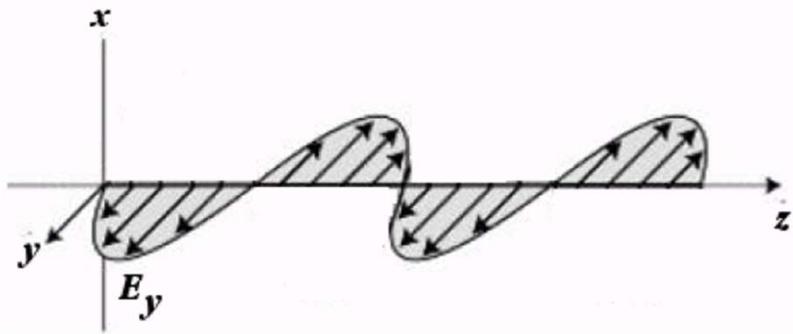
La onda se propaga a lo largo de z

Hay tres tipos de polarizaciones:

- Lineal
- Circular
- Elíptica

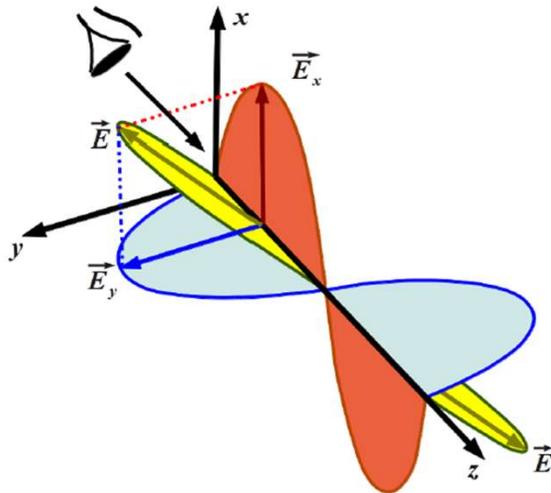
Polarización lineal

el plano del campo eléctrico no cambia a medida que la onda se propaga



$$\mathbf{E}_x = 0$$
$$\mathbf{E}_y = \mathbf{e}_y E_{0y} \cos(\omega t - kz)$$

Una onda polarizada linealmente puede considerarse como una suma vectorial de dos ondas en planos ortogonales que se propagan en la misma dirección:



$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y$$

$$\mathbf{E}_x = \mathbf{e}_x E_{0x} \cos(\omega t - kz)$$

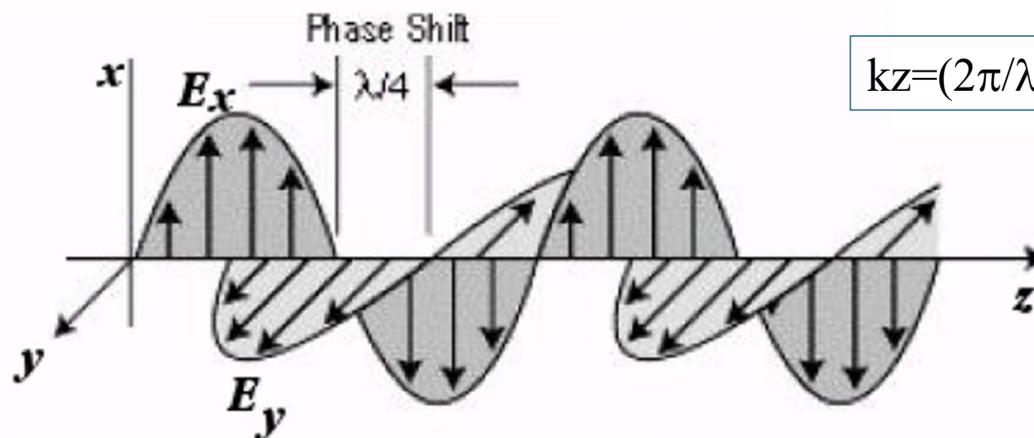
$$\mathbf{E}_y = \mathbf{e}_y E_{0y} \cos(\omega t - kz)$$

Diferencia de fase entre E_x y E_y es cero.

Magnitudes de E_x y E_y pueden ser diferentes

Polarización circular

Si $E_{0x} = E_{0y}$ y existe una diferencia de fase de $\pi/2$ o $-\pi/2$ entre ellos, el vector de campo eléctrico describe un círculo.



$$kz = (2\pi/\lambda)z = \pi/2 \Rightarrow z = \lambda/4$$

$$\mathbf{E}_x = \mathbf{e}_x E \cos(\omega t - kz)$$

$$\mathbf{E}_y = \mathbf{e}_y E \cos(\omega t - kz \pm \pi/2) = \pm \mathbf{e}_y E \sin(\omega t - kz)$$

$$E_{0x} = E_{0y} = E$$

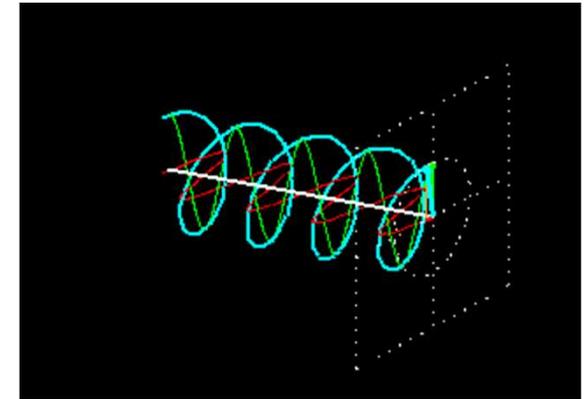
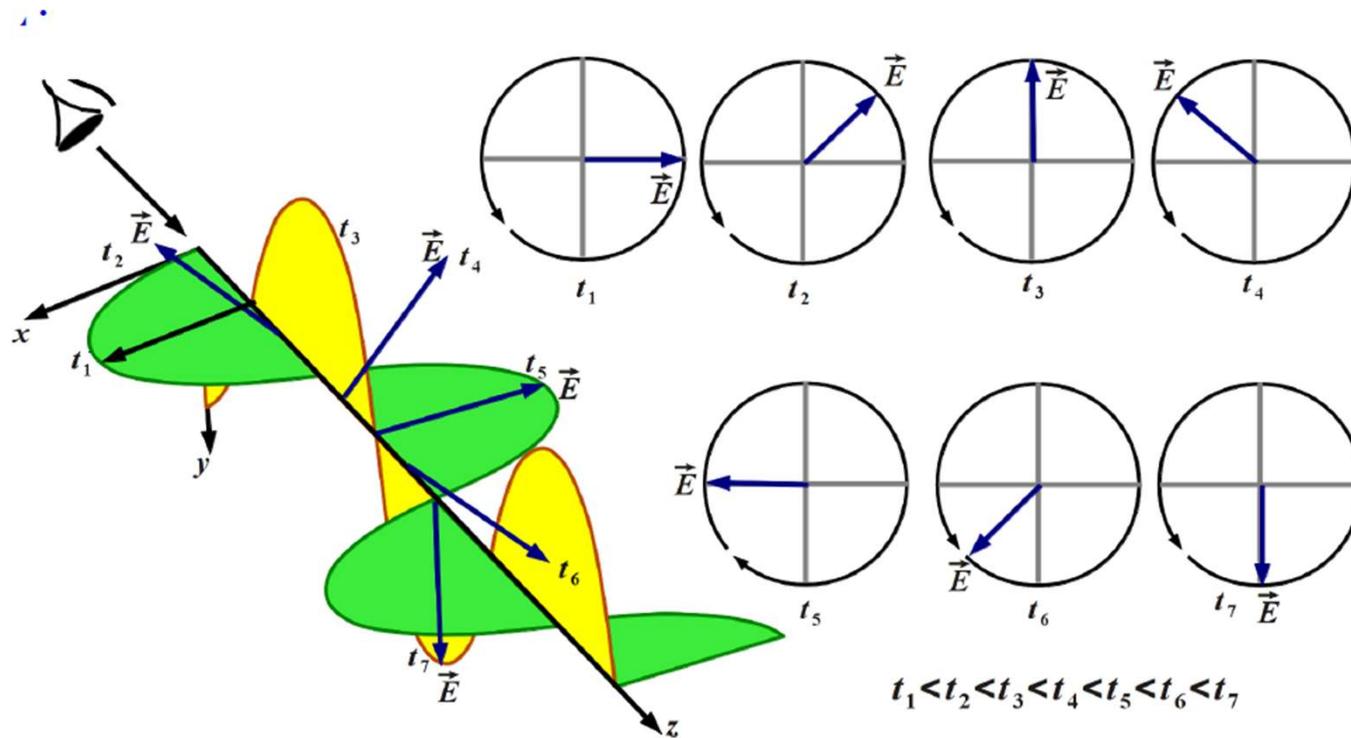
(Ej. desfase $\pi/2$):

$$E_y^2 = E^2 (1 - \cos^2(\omega t - kz))$$

$$E_x^2 = E^2 \cos^2(\omega t - kz)$$

$$\Rightarrow E_x^2 + E_y^2 = E^2 \text{ (ecuación de un círculo)}$$

Si el campo eléctrico E gira como dextrógiro, visto desde la fuente, la polarización se define **circular dextrógiro**. Por el otro sentido, se define **circular levógiro**.

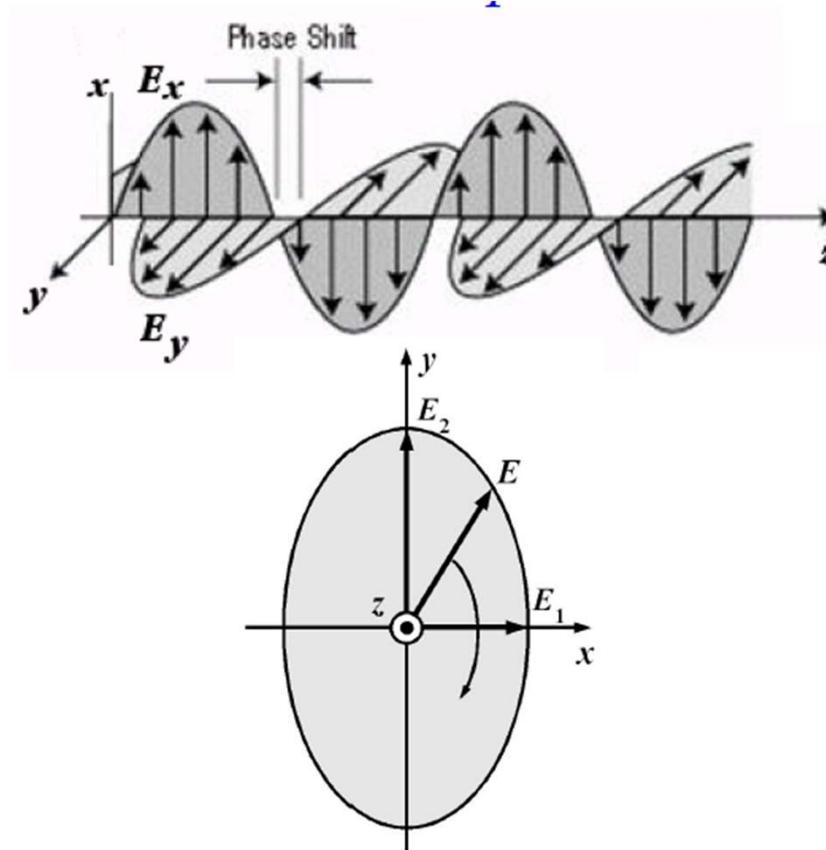


Sumando una polarización dextrógiro y una levógiro se obtiene una polarización lineal:

$$\mathbf{E} = \mathbf{e}_x E \cos(\omega t - kz) + \mathbf{e}_y E \cos(\omega t - kz + \pi/2) + \mathbf{e}_x E \cos(\omega t - kz) + \mathbf{e}_y E \sin(\omega t - kz - \pi/2) = \mathbf{e}_x 2E \cos(\omega t - kz)$$

Polarización elíptica

Si E_{0x} y E_{0y} no son iguales, y existe una diferencia de fase ε cualquiera entre ellos, el vector de campo eléctrico describe una elipse

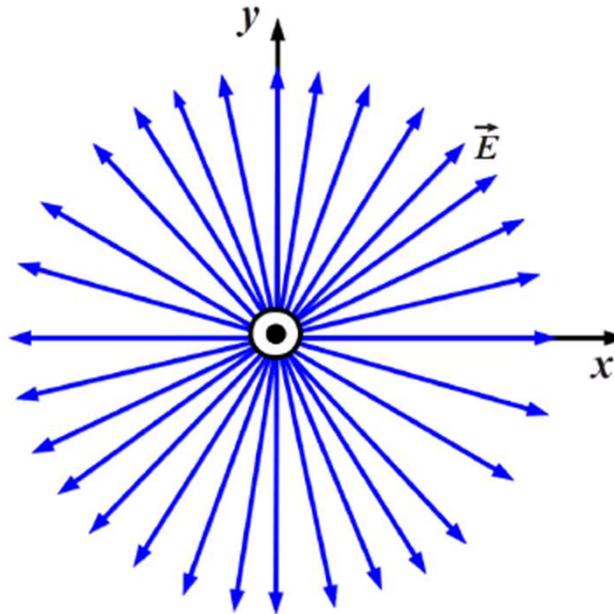


$$\mathbf{E} = \mathbf{e}_x E_{0x} \cos(\omega t - kz) + \mathbf{e}_y E_{0y} \cos(\omega t - kz + \varepsilon)$$

Operando la transformación como en el caso de polarización circular:

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \cos \varepsilon = \sin^2 \varepsilon \quad (\text{ecuación de una elipse})$$

Onda no polarizada

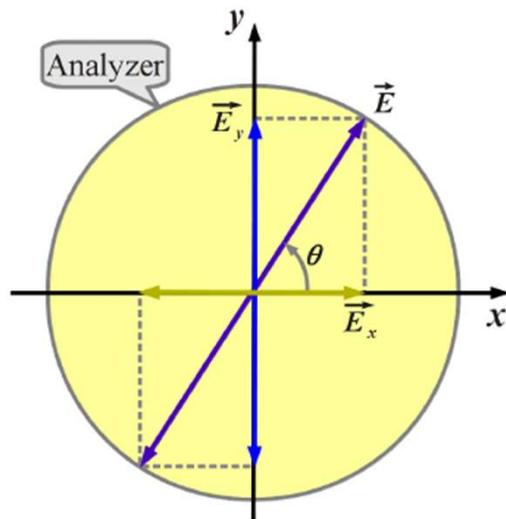


El plano del campo eléctrico cambia su orientación aleatoriamente en el tiempo.

Como se mide el vector polarización el caso de polarización lineal

Es posible extraer una o más componentes de la polarización de una onda polarizada linealmente utilizando un polarizador

(un polarizador es un filtro formado por un material (cristal) que solo transmite una determinada dirección de oscilación del campo eléctrico)



Onda polarizada E en un ángulo θ ingresa a un polarizador (analizador):

Si el eje de transmisión del analizador es paralelo a **x**: $E_x = E \cos \theta$.

Si el eje de transmisión del analizador es paralelo a **y**: $E_y = E \sin \theta$

Si el eje del analizador es perpendicular a E, la luz transmitida es nula

Parámetros de Stokes

El estado de polarización de la luz se puede caracterizar completamente a través de cuatro cantidades reales, conocidas como los cuatro parámetros de Stokes (1852). Estos se basan en la intensidad media de la luz polarizada en un conjunto de estados particulares.

El método utiliza un polarizador y un retardador placa de cuarto de onda para medir la intensidad transmitida en diferentes ángulos, lo que da como resultado un conjunto de cuatro componentes

$$S_0 = I_x + I_y$$

$$S_1 = I_x - I_y$$

$$S_2 = I_{x'} - I_{y'}$$

$$S_3 = I_{\sigma^+} - I_{\sigma^-},$$

Donde los I_k representan la intensidad transmitida de cada filtro de polarización

Escribimos los parámetros de Stokes explicitando los valores de los ángulos del vector polarización

$$S_0 = I_0 + I_{90}, \quad S_1 = I_0 - I_{90}, \quad S_2 = I_{45} - I_{-45}, \quad S_3 = I_+ - I_-$$

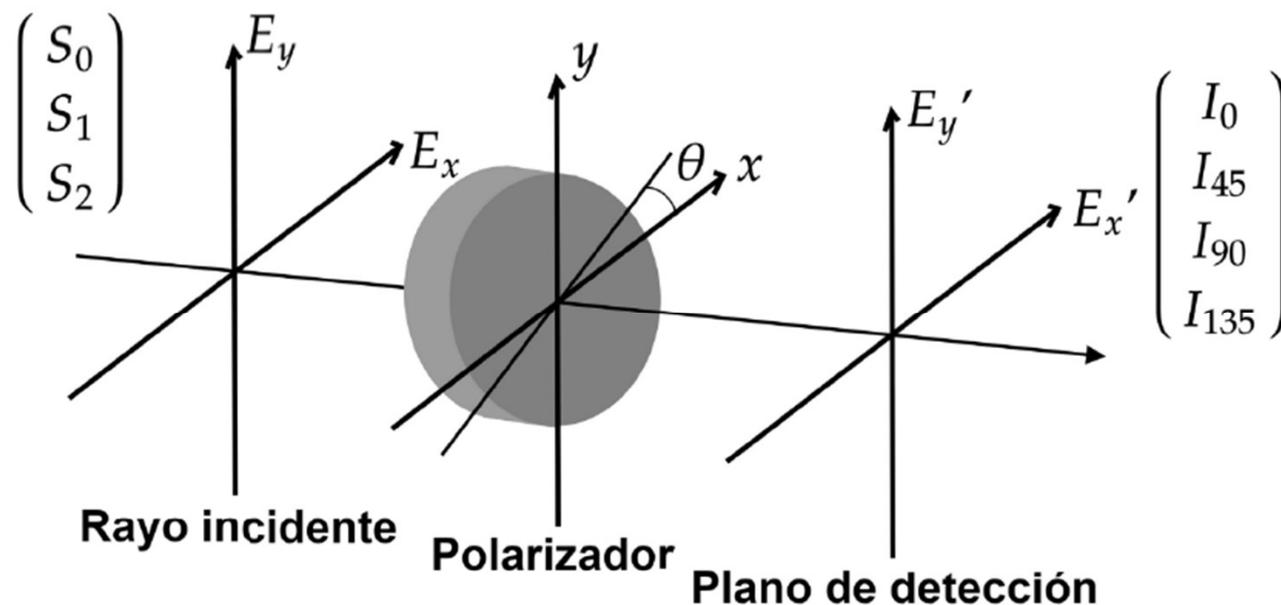
I_0 y I_{90} son las intensidades de la luz polarizada linealmente en los ángulos 0° , 45° , 90° y 135° .
 I_+ e I_- son las intensidades de la luz polarizada circularmente en dirección dextrógira y levógira.
 S_0 mide la intensidad total

Para medir qué tan polarizado está un rayo de luz se utiliza una cantidad denominada Grado de Polarización (DoP):

$$DoP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}$$

Para luz no polarizada $DoP = 0$, para un haz perfectamente polarizado $DoP = 1$.
En general, para luz parcialmente polarizada, $0 \leq DoP \leq 1$.

Como medir los parámetros de Stokes S0, S1, S2



Para medir S_3 se pone una lamina cuarto de onda ($\lambda/4$) antes del polarizador. Se gira la lamina para que esta no afecte la polarización de la luz entrante y después se gira de $\pm 22.5^\circ$ para medir las dos componentes circulares

Table 1
Relation between analyzer adjustment and measured intensities.

Component	QuarterWavePlate	Polarizer	Transmitted state
I_x	no	at 0°	\uparrow
I_y	no	at 90°	\rightarrow
I_{45}	no	at $+45^\circ$	\nearrow
I_{135}	no	at -45°	\searrow
I_{σ^+}	at $+22.5^\circ$	at 0°	circ. right
I_{σ^-}	at -22.5°	at 0°	circ. left

Como relaciono los parámetros de Stokes con el tipo de polarización

Se definen dos ángulos ψ (psi) y Δ (delta) como cantidades que permiten caracterizar el tipo de polarización de la luz reflejada

$$\tan(\Psi) = E_{0x} / E_{0y}$$

siendo $E_x = E_{0x} \cos(\omega t - \varepsilon_x)$ y $E_y = E_{0y} \cos(\omega t - \varepsilon_y)$

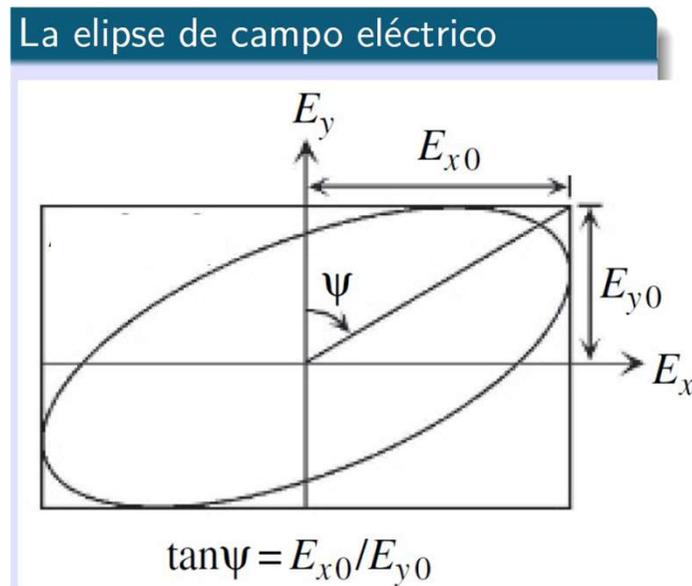
$$\Delta = \varepsilon_x - \varepsilon_y$$

- ψ es el ángulo que describe la reflexión anisotrópica de las componentes de polarización paralela y perpendicular al plan de incidencia
- Δ es la diferencia de fase entre las dos componentes de polarización paralela y perpendicular al plano de incidencia

Se define el coeficiente de reflexión como del cociente entre el campo reflejado y el campo incidente :

$$R_x = E_{rx} / E_{ix} \text{ y } R_y = E_{ry} / E_{iy} \quad (\text{siendo } E_i \text{ } E_r \text{ las polarizaciones incidente y reflejada)}$$

$$R = R_x / R_y = \tan(\Psi) e^{i\Delta}$$



Los valores de ψ y Δ obtenidos se ajustan luego a un modelo matemático del sistema para extraer parámetros del material en estudio como: índice de refracción (parte real y compleja), espesor de una película, parámetros de rugosidad.

Desarrollando cálculos, los ángulos ψ y Δ se pueden escribir en función de los parámetros de Stokes como:

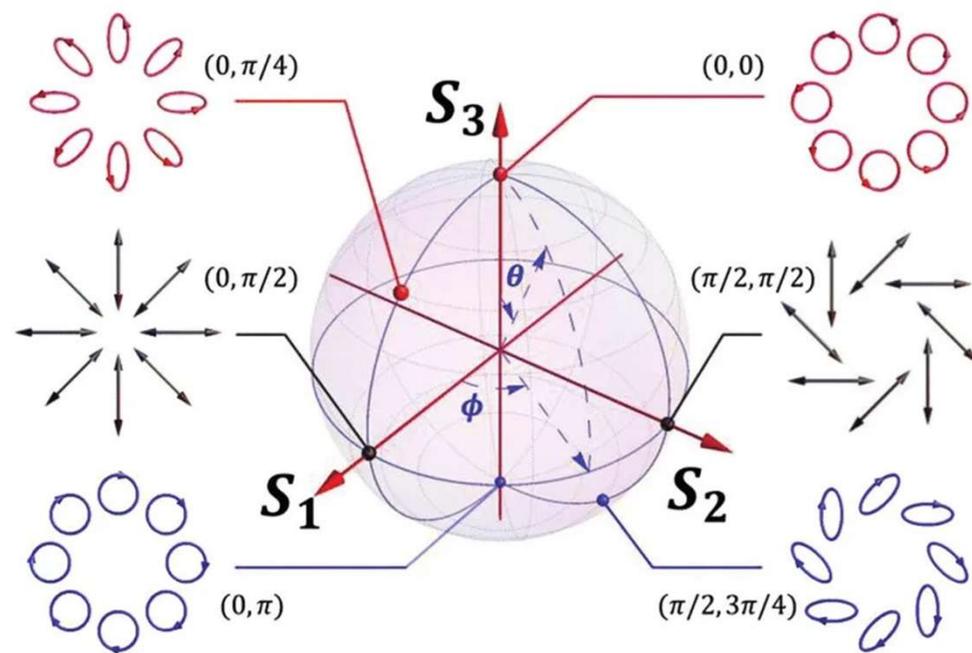
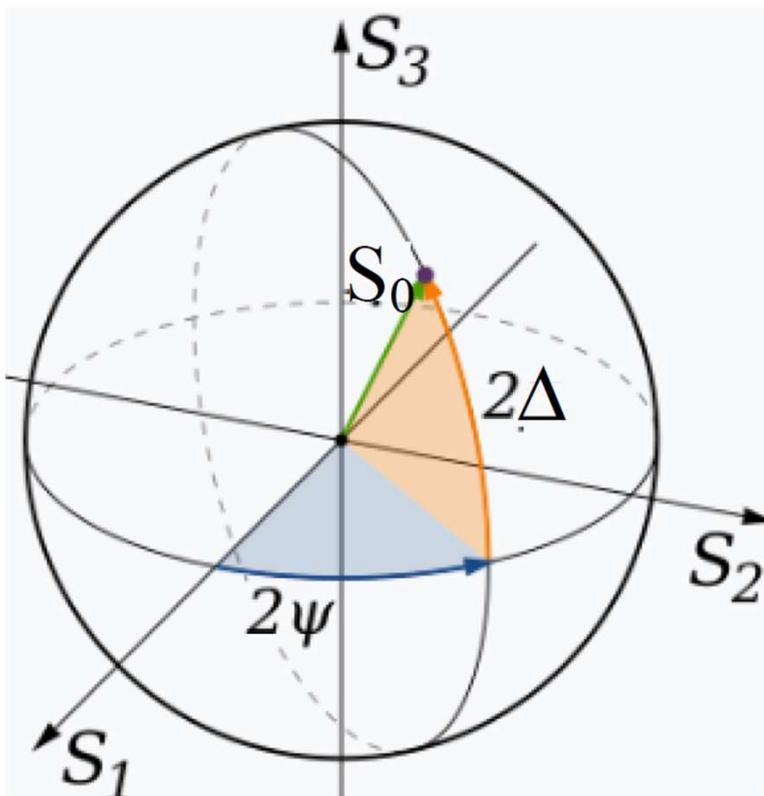
$$\psi = \arccos \left(\frac{-S_1}{S_0} \right) / 2$$

$$\Delta = \arctan \left(\frac{-S_3}{S_2} \right)$$

Si $V \simeq 1 \Rightarrow$

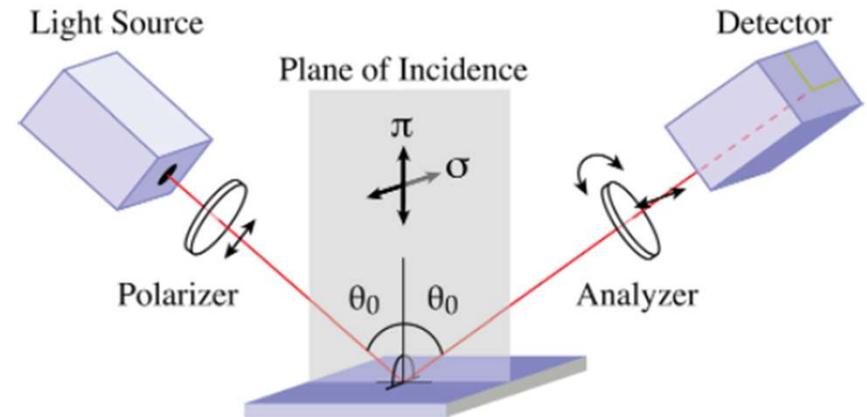
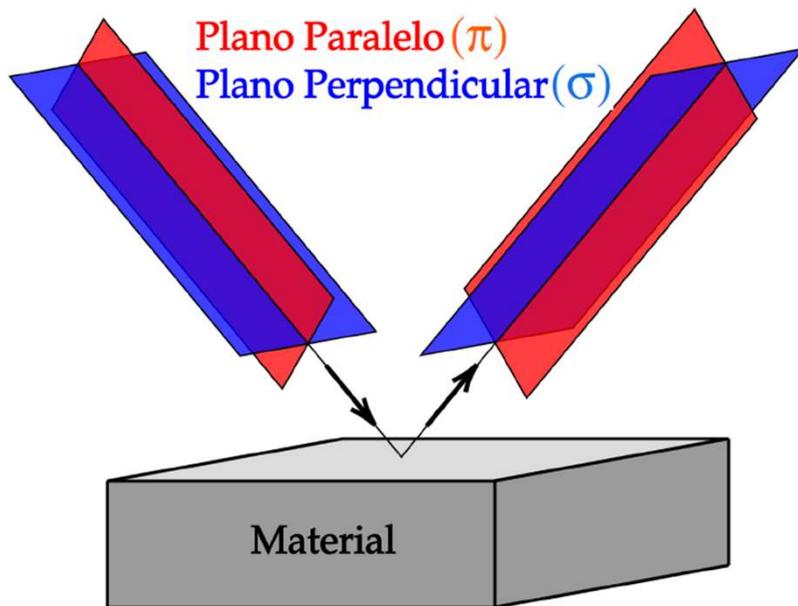
$$\Delta = \arccos \left(\frac{\frac{-S_2}{S_0}}{\sin(2\psi)} \right)$$

Un estado arbitrario de polarización se representa mediante un vector en la **esfera de Poincaré**.



Elipsometría

A partir de la medida del estado de la polarización de la luz, se pueden determinar los valores de diferentes cantidades que caracterizan el material en estudio



Existen dos factores que contribuyen al cambio del estado de polarización de un haz de luz que incide sobre la superficie de un material:

- 1) el cambio de fase debido a la interferencia de las multicapas de material que atraviesa la luz
- 2) la reflectividad anisotrópica de las componentes paralela (π) y perpendicular (σ) respecto al plano de incidencia.

Como se extraen de los ángulos ψ y Δ el índice de refracción y/o el espesor de una película

Vimos que los ángulos ψ y Δ están relacionados con el coeficiente de reflexión \mathbf{R} .

\mathbf{R} contiene la información sobre el cambio de polarización de la onda al interactuar con el medio.

$$\mathbf{R} = \frac{R^\pi}{R^\sigma} = \tan(\Psi) e^{i\Delta}$$

R^π y R^σ son los coeficientes de reflexión complejos totales y su expresión depende del modelo físico del sistema que se estudia.

Analizaremos dos casos comunes

- un material constituido por un medio con índice de refracción n_1 y un substrato con índice de refracción n_2 cuyo ancho podemos considerar infinito.
- un material constituido por un medio con índice de refracción n_0 , una película fina de espesor d e índice de refracción n_1 , y un substrato con índice de refracción n_2 .

Sobre el material ocurren infinitas reflexiones y transmisiones del rayo de luz que interfieren formando un patrón y que se pueden modelar matemáticamente.

Las expresiones de los coeficientes de reflexión y de transmisión se pueden calcular utilizando los coeficientes de Fresnel para cada componente perpendicular y ortogonal de la polarización de la luz.

Material constituido por un medio ambiente con índice de refracción n_1 y un substrato con índice de refracción n_2

Coeficientes de Fresnel - Ley de Snell - Psi/Delta

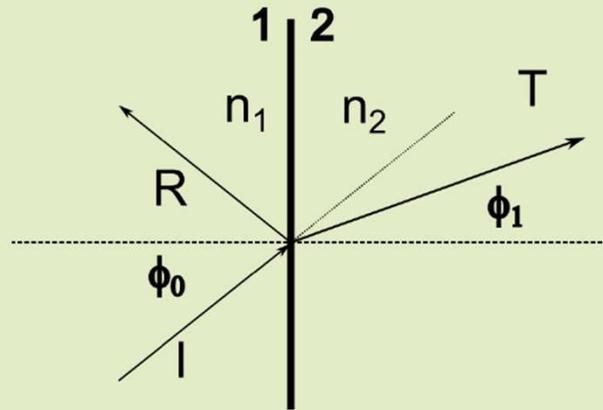
$$T_{\sigma} = \frac{2\hat{n}_1 \cos \phi_0}{\hat{n}_2 \cos \phi_0 + \hat{n}_1 \cos \phi_1}$$

$$T_{\pi} = \frac{2\hat{n}_1 \cos \phi_0}{\hat{n}_1 \cos \phi_0 + \hat{n}_2 \cos \phi_1}$$

$$R_{\sigma} = \frac{\hat{n}_2 \cos \phi_0 - \hat{n}_1 \cos \phi_1}{\hat{n}_2 \cos \phi_0 + \hat{n}_1 \cos \phi_1}$$

$$R_{\pi} = \frac{\hat{n}_1 \cos \phi_0 - \hat{n}_2 \cos \phi_1}{\hat{n}_1 \cos \phi_0 + \hat{n}_2 \cos \phi_1}$$

$$\frac{\sin \phi_0}{\sin \phi_1} = \frac{n_2}{n_1}$$



\hat{n}_1 y \hat{n}_2 son complejos y dependen de longitud de onda

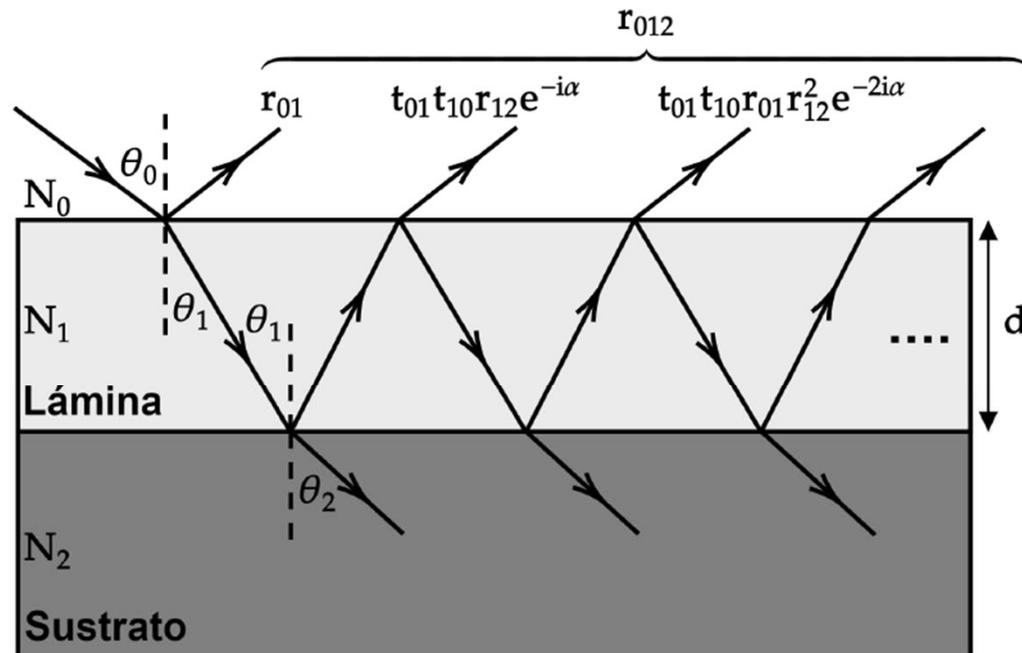
$$R = \frac{R_{\pi}}{R_{\sigma}} = \tan(\psi) e^{i\Delta}$$

$$\psi = \arccos \left(\frac{-S_1}{S_0} \right) / 2$$

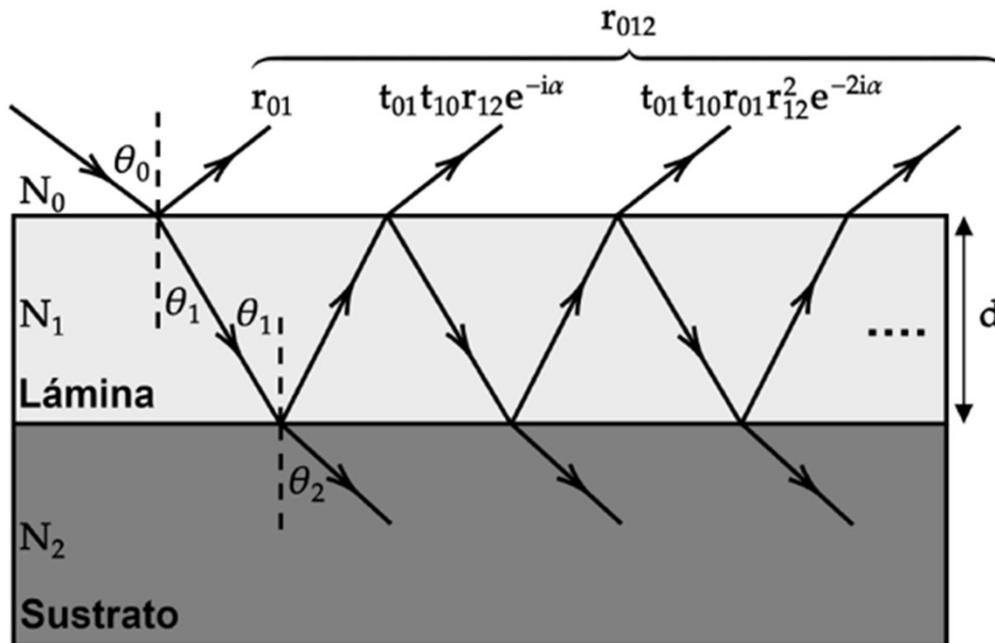
$$\Delta = \arctan \left(\frac{-S_3}{S_2} \right)$$

Normalmente el medio ambiente es aire ($n_1=1$). Los valores de ψ y Δ se determinan experimentalmente a partir de la medida de los parámetros de Stokes. Ajustando entonces los valores medidos de ψ y Δ con la función R , se obtiene el valor del índice de refracción complejo n_2 del substrato (n_2 es el valor del parámetro resultado del ajuste)

Material constituido por un medio ambiente con índice de refracción n_0 , una película fina de espesor d e índice de refracción n_1 , y un sustrato con índice de refracción n_2



Haz de luz incidiendo sobre un sistema ambiente-lámina-sustrato y sus respectivas reflexiones y transmisiones en ambas capas del material.



$$r_{01,\sigma} = \frac{\tilde{n}_1 \cos(\theta_0) - \tilde{n}_0 \cos(\theta_1)}{\tilde{n}_1 \cos(\theta_0) + \tilde{n}_0 \cos(\theta_1)}$$

$$r_{12,\sigma} = \frac{\tilde{n}_2 \cos(\theta_1) - \tilde{n}_1 \cos(\theta_2)}{\tilde{n}_2 \cos(\theta_1) + \tilde{n}_1 \cos(\theta_2)}$$

$$r_{012,\pi} = \frac{r_{01,\pi} + r_{12,\pi} e^{-i\alpha}}{1 + r_{01,\pi} r_{12,\pi} e^{-i\alpha}} \quad r_{012,\sigma} = \frac{r_{01,\sigma} + r_{12,\sigma} e^{-i\alpha}}{1 + r_{01,\sigma} r_{12,\sigma} e^{-i\alpha}}$$

$$\alpha = 2\pi \frac{d}{\lambda} N_1 \cos(\theta_1) = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sqrt{N_1^2 - N_0^2 \sin^2(\theta_0)}$$

diferencia de fases entre el rayo reflejado y el rayo transmitido

$$R = \frac{r_{012,\pi}}{r_{012,\sigma}} = \tan(\Psi) e^{i\Delta}$$

Calculo diferencia de camino óptico entre los dos rayos 1 y 2 de la figura:

Diferencia en trayecto óptico : Γ

$$\Gamma = n(AB + BC) - AD$$

$$AB = \frac{d}{\cos \beta} \quad AD = (2d \tan \beta) \operatorname{sen} \alpha$$

$$AD = 2d \tan \beta (n \operatorname{sen} \beta)$$

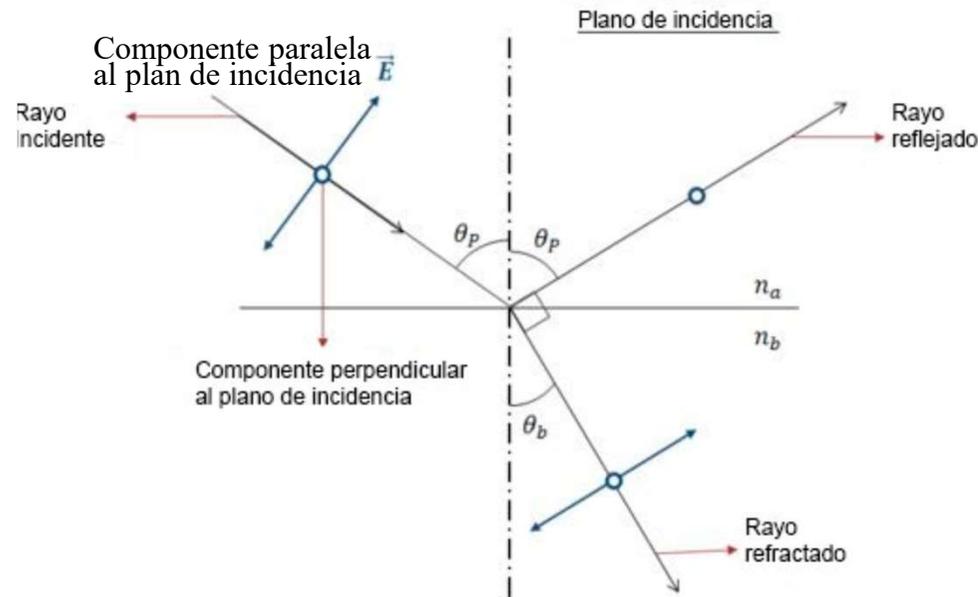
Recogiendo términos:

$$\Gamma = 2dn \left[\frac{1}{\cos \beta} - \tan \beta \operatorname{sen} \beta \right]$$

$$\Gamma = 2dn \left[\frac{1 - \operatorname{sen}^2 \beta}{\cos \beta} \right] = 2dn \cos \beta$$

Angulo de Brewster

porque es importante el ángulo de Brewster y que pasa a la luz



Al incidir un haz de luz con el ángulo de Brewster, la componente de la polarización paralela al plano de incidencia se anula en el haz reflejado.

La reflexión de un material se genera porque la luz, al incidir sobre el mismo, polariza el material induciendo dipolos. El mecanismo físico depende del material que refleja. El efecto es que el dipolo inducido a su vez irradia una onda electromagnética, generando así luz reflejada.

En el ángulo de Brewster el vector dipolo inducido en el material por la componente paralela del campo oscila en paralelamente a la dirección del rayo reflejado. El resultado es que no hay emisión de radiación en esta dirección

Se debe notar que en el caso de incidir con un haz linealmente polarizado en la dirección paralela al plano de incidencia, el haz reflejado se anula en el ángulo de Brewster. En este caso, se produce una transmisión total del haz entre ambos medios.

En este ejemplo se pone un polarizador alineado con el plano de incidencia para eliminar la luz reflejada (el observador es alineado mas o menos con la reflexión en el ángulo de Brewster)

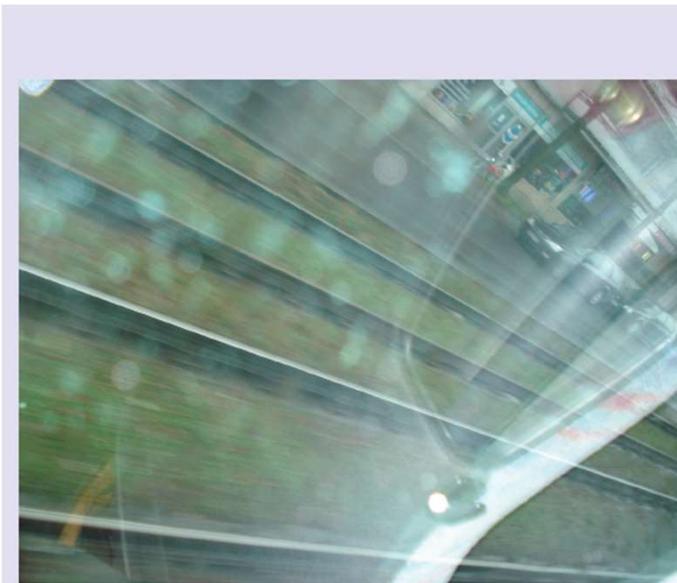


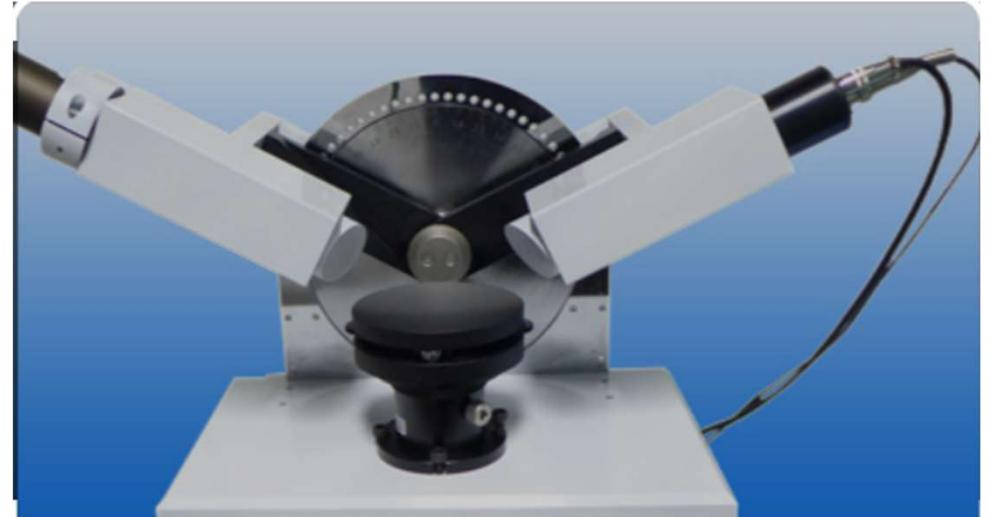
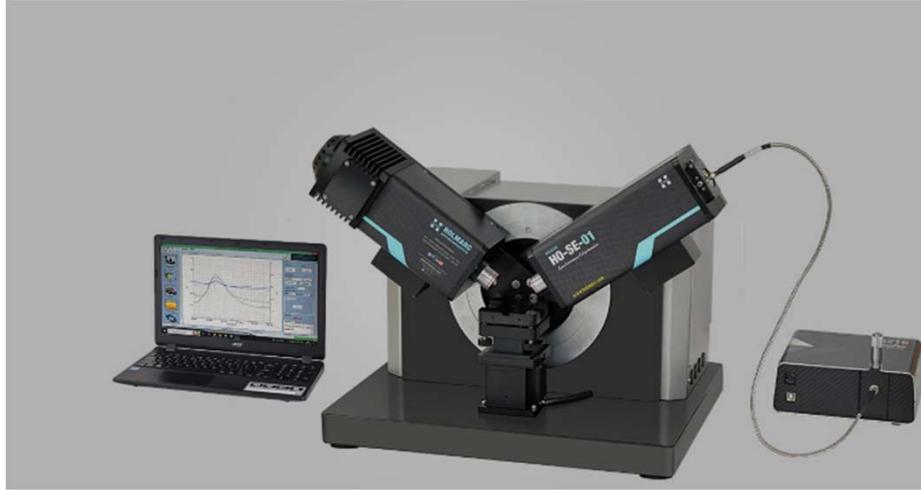
Foto sin filtro polarizador



Foto con filtro polarizador ajustado para cancelar a reflexión

La tangente del Angulo de Brewster (según la ley de Snell) es igual al coeficiente de refracción del material (en el caso de luz que se propaga en aire e incide en un material)

Elipsometros comerciales



Los primeros elipsometros

Jules Célestin Jamin (1818-1886), francés, describió el primer elipsometro

161 Grand cercle de Jamin et Sénarmont, pour la mesure précise des angles des indices de réfraction et l'étude des lois de la polarisation de la lumière réfléchie sur substances métalliques ou cristallisées et sur les liquides. Diamètre du cercle 260 millimètres 1500

Ce cercle monté sur une forte colonne avec pied à vis calantes, peut être placé soit horizontalement soit verticalement; son diamètre est de 260 millimètres, sa division est en sixièmes de degré, les alidades porte-lunettes ont des verniers divisés de 59 en 60 donnant les 10 secondes (Fig. 45).

Deux petits cercles avec alidades, reçoivent le polariseur **Foucault** ou **Nicol** et les analyseurs **Nicol** ou prisme biréfringent. Ces cercles portent des divisions en demi-degrés et alidades avec double vernier de 29 en 30, donnent la minute. Les analyseurs **Nicol** et prismes biréfringents peuvent recevoir, soit une loupe, soit une lunette de Galilée.

Une lunette avec réticule rectifiable, un collimateur avec réticule et fente à ouverture variable.

Un prisme en flint de 60°; un prisme creux de pour les indices de réfraction des liquides.

Deux platines porte-prismes; l'une avec glace, l'autre munie de trois vis calantes pour dégager le plan horizontal et deux vis de rappel pour se centrer par rapport à l'axe vertical de l'instrument.

Une plaque à deux rotations avec lentille de champ.

Un porte-miroirs avec rappel et bascule pour observer la réflexion simple ou multiple.

Une série de seize miroirs: 2 en flint, 2 en croc, 2 en acier, 2 en cuivre, 2 en argent, 2 en or, 2 en mica de télescope, 1 moitié métal moitié obsidienne, 1 spath-fluor.

Un compensateur **Babinet-Jamin**, avec micrométrique à pas d'un demi-millimètre, tambour divisé en cinquante parties.

Un appareil à

reil à

neaux o

rés (Fig.

Deux

bes ter

nés par

glaces

raillè

pour l'

servati

des crist

dans les

quides.

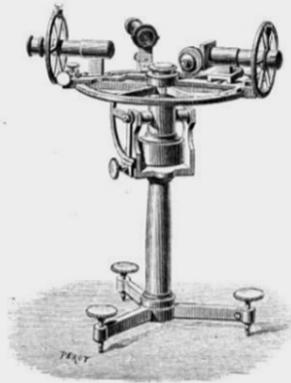


Fig. 45.

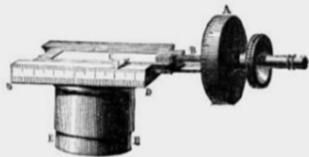


Fig. 46

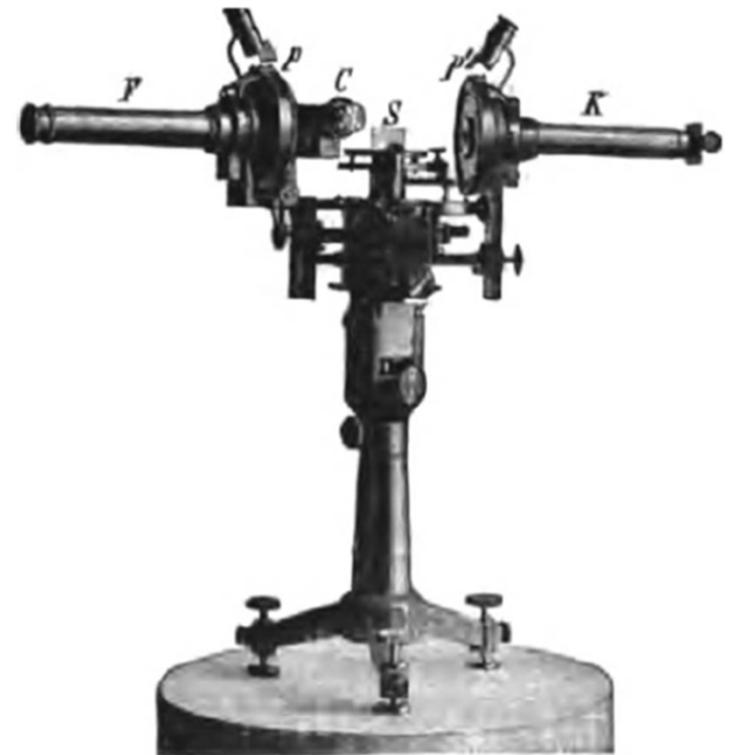
Une cuve avec support ayant en son centre une glace plane noire.

Un porte-glace avec glace parallèle pour l'étude de l'action de la lumière polarisée sur surfaces cristallines; le rayon incident arrivant normalement à ces surfaces.

Tous les accessoires sont dans un nécessaire gainé.

Une notice spéciale avec figures indique les positions relatives de chaque pièce dans les diverses expériences.

Elipsometro de 1932 de Tronstad (científico noruego)



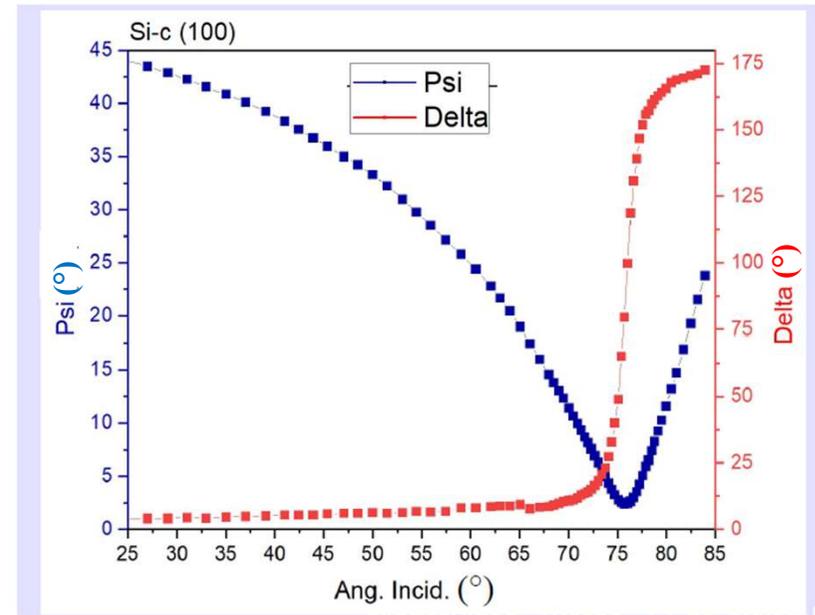
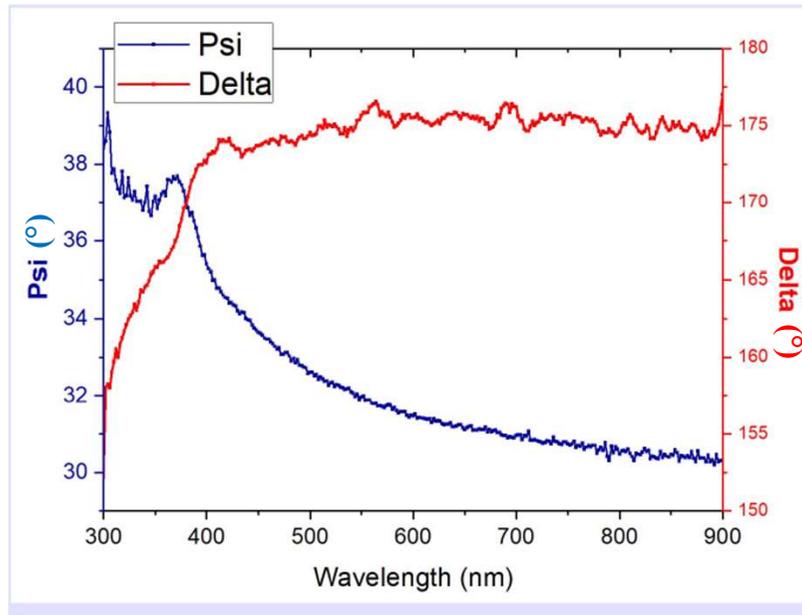
Los ángulos ψ y Δ medidos por un elipsometro se pueden obtener de dos formas distintas:

- **En función de la longitud de onda de la luz** con ángulo de incidencia fijo (en este caso típicamente se usa luz blanca como fuente de radiación).
- **En función del ángulo de incidencia** dejando la longitud de onda de la luz fija (en este caso como fuente de luz se puede usar un led o un laser).

Se recuerda que la expresión del coeficiente de reflexión R depende de los coeficientes de Fresnel, que a su vez dependen del ángulo de incidencia θ y de la longitud de onda λ de la radiación.

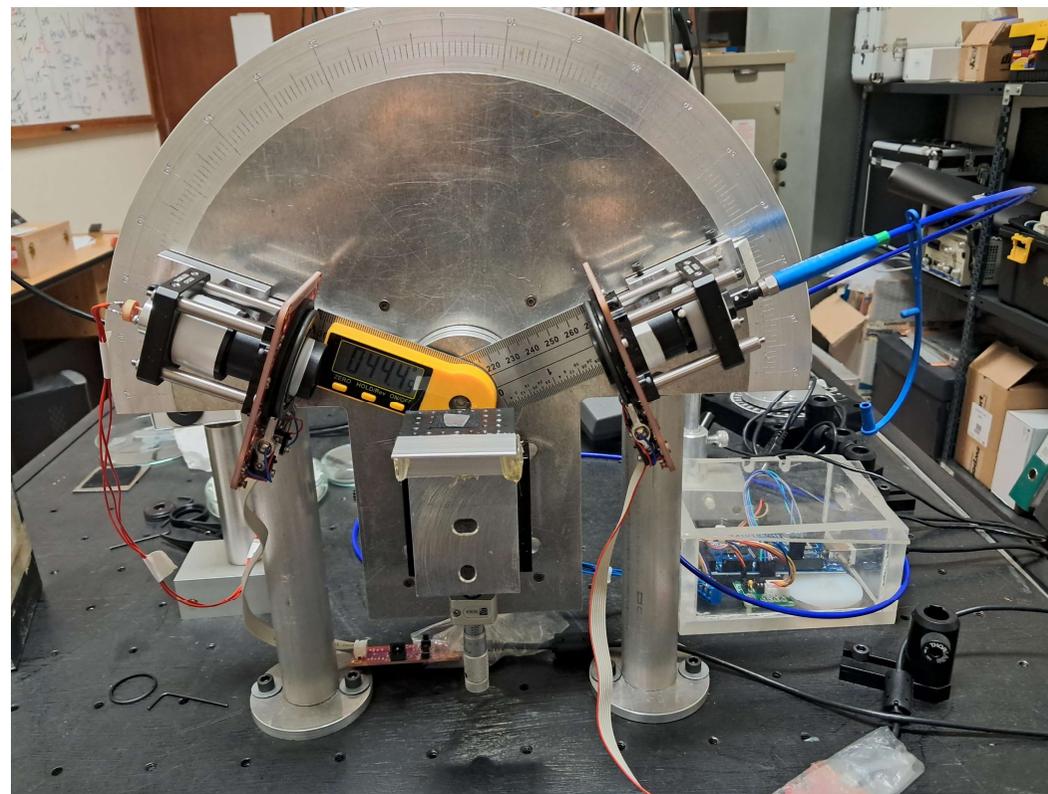
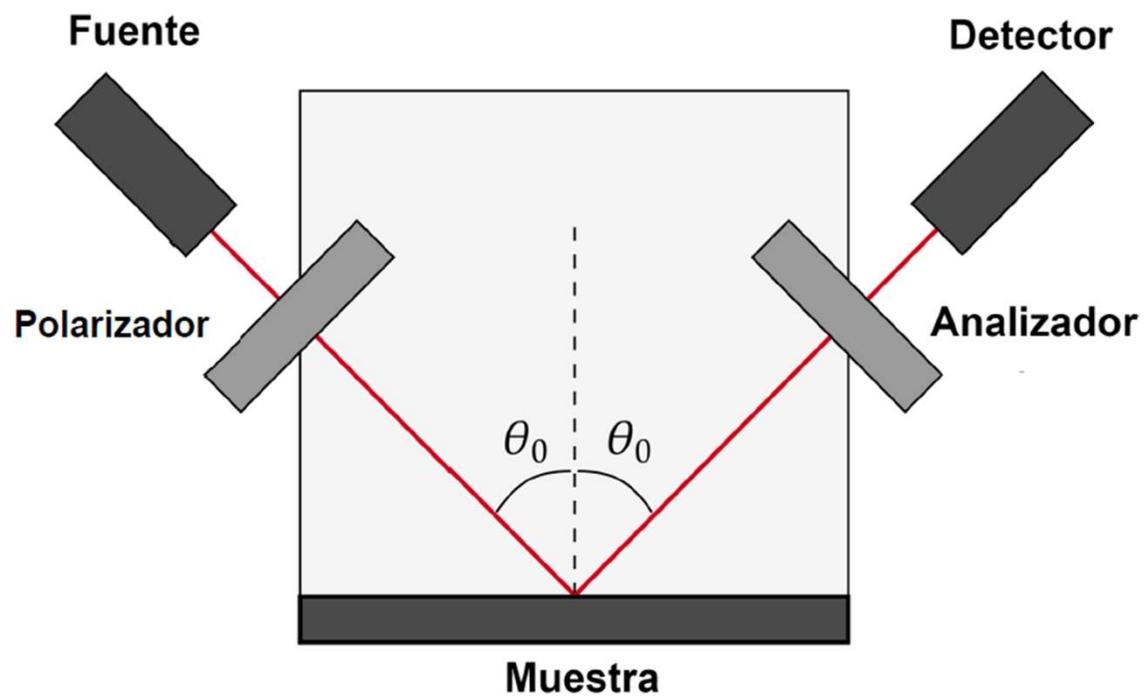
Por esta razón se pueden medir ψ y Δ y realizar los respectivos ajustes en función de θ o de λ .

Típica medida de ψ y Δ para Silicio cristalino en función de la longitud de onda y del ángulo de incidencia



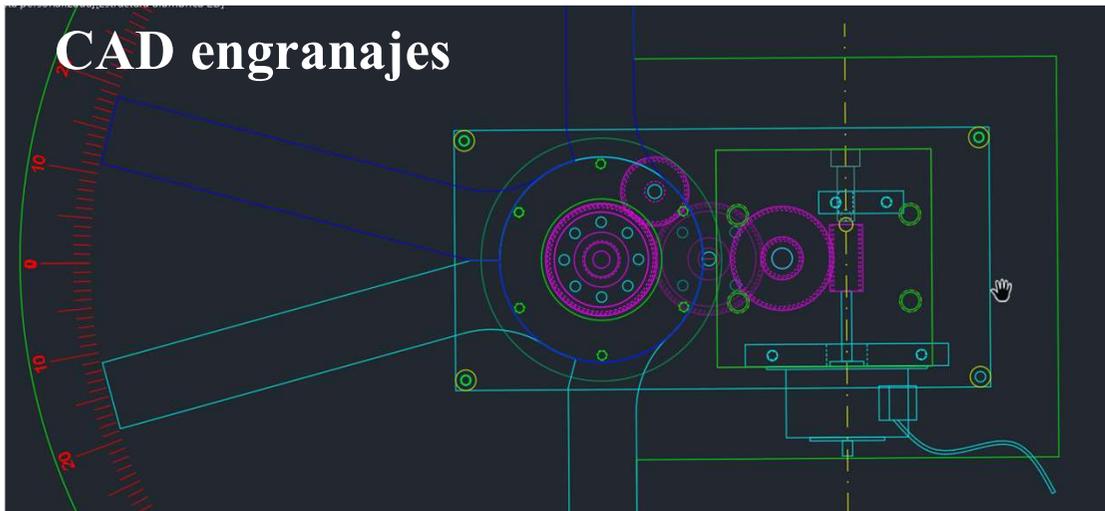
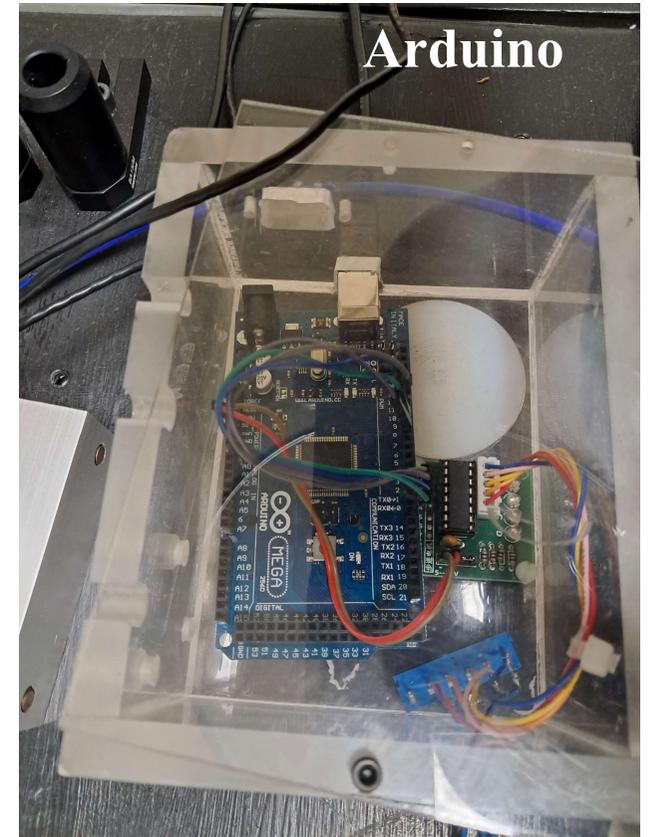
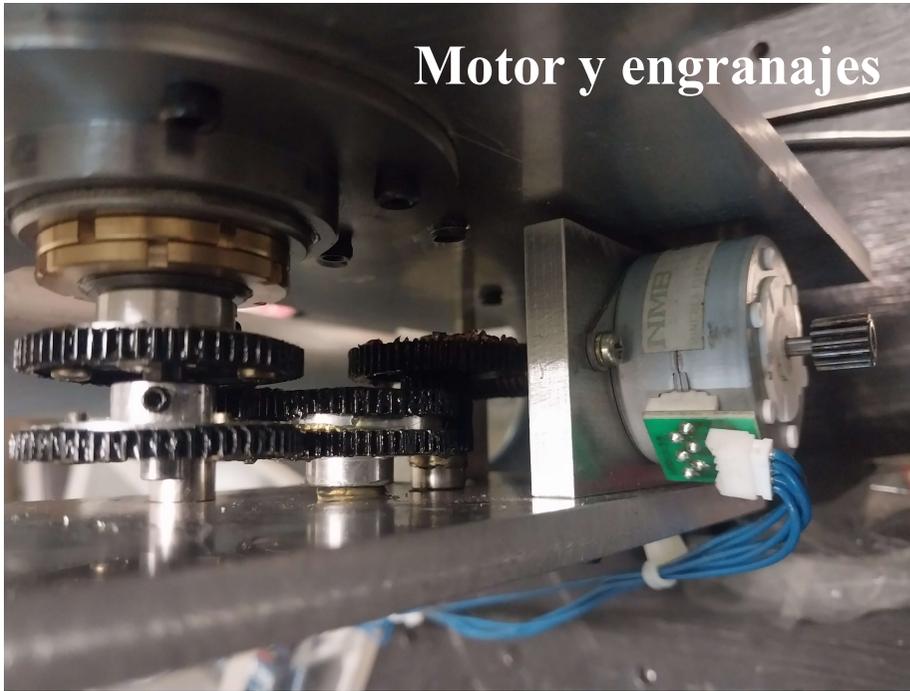
A partir de los valores de ψ y de Δ , se realizan ajustes utilizando el modelo teórico correspondiente al sistema en estudio para determinar parámetros característicos de interés de la muestra.

Nuestro instrumento “el Toni”



Mecánica para control del movimiento angular de los dos brazos:

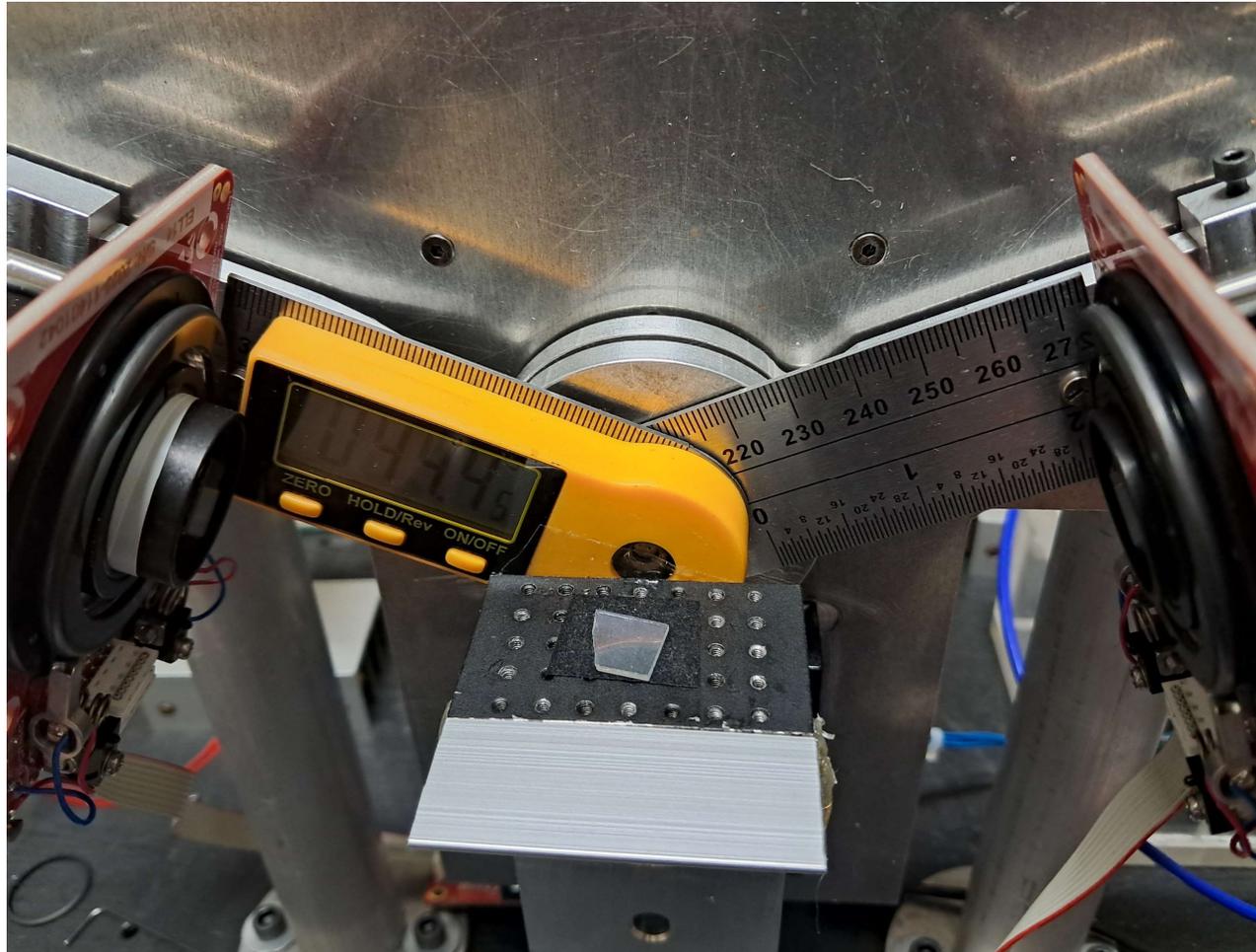
- dos brazos de 20 cm de longitud se mueven sobre un goniómetro
- el movimiento angular de los dos brazos está controlado por un motor paso a paso (con paso de 1°) y una serie de engranajes que reducen el paso mínimo a **0.05°**
- el motor se controla con una plataforma Arduino Mega mediante el software Labview a través de una interfaz usb
- un medidor de ángulos digital con una resolución de 0.05° mide el ángulo entre los dos brazos



Componentes ópticos:

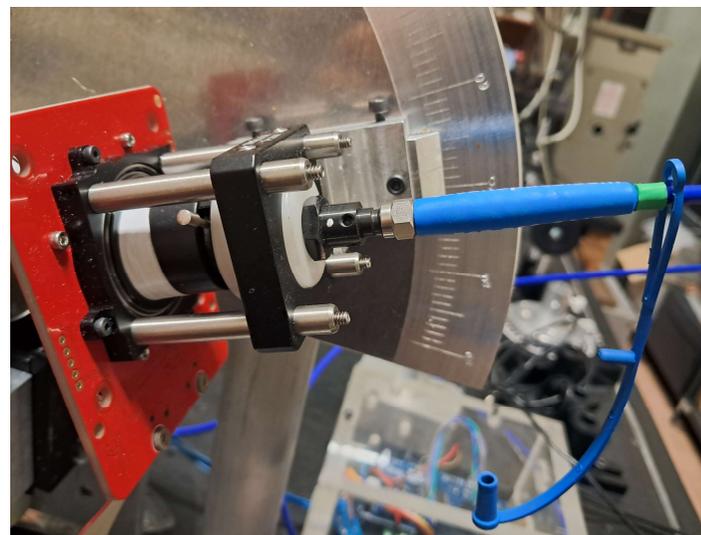
- Los componentes ópticos se posicionan sobre los dos brazos a través de soportes mecánicos hechos a propósito
- Luz de diferentes fuentes (led, láser, lámpara de tungsteno) se acopla en fibra.
- La luz a la salida de la fibra es colimada con un objetivo, luego pasa a través de un iris y un polarizador lineal montados en un soporte cuya rotación es controlada por un motor piezoeléctrico
- El haz reflejado por la muestra pasa a través de un polarizador lineal (que actúa como analizador), montado en un segundo motor piezoeléctrico y es detectado por un fotodiodo de silicio.
- El movimiento angular (con una resolución de 0.01°) de los dos motores es controlado por el software Labview a través de una interfaz usb.

Sistema óptico con muestra



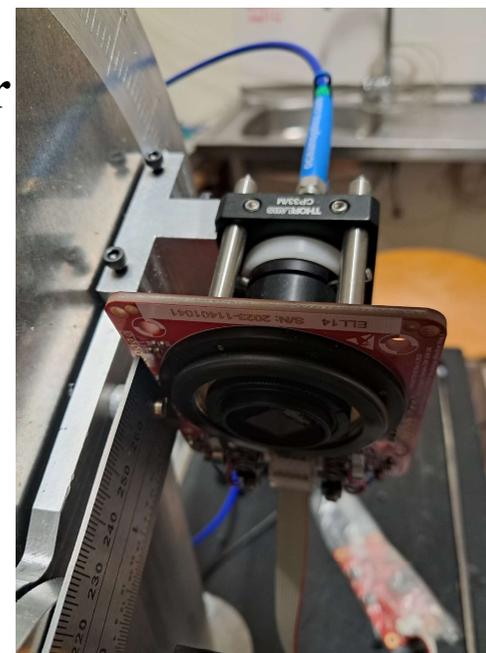
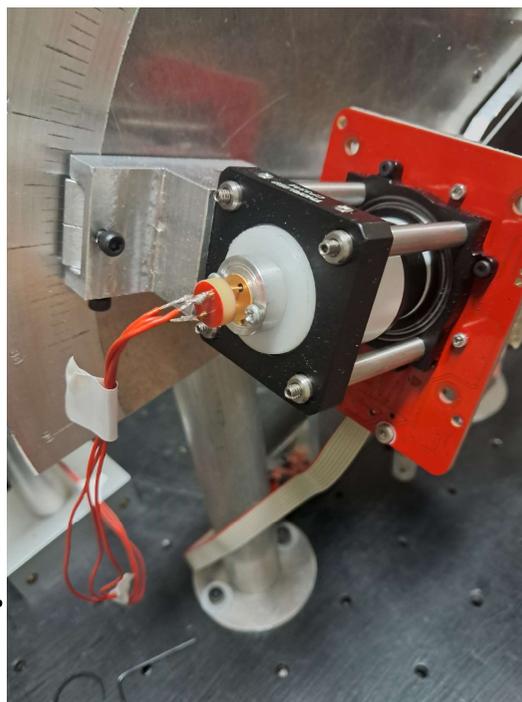


**Led acoplado
in fibra**

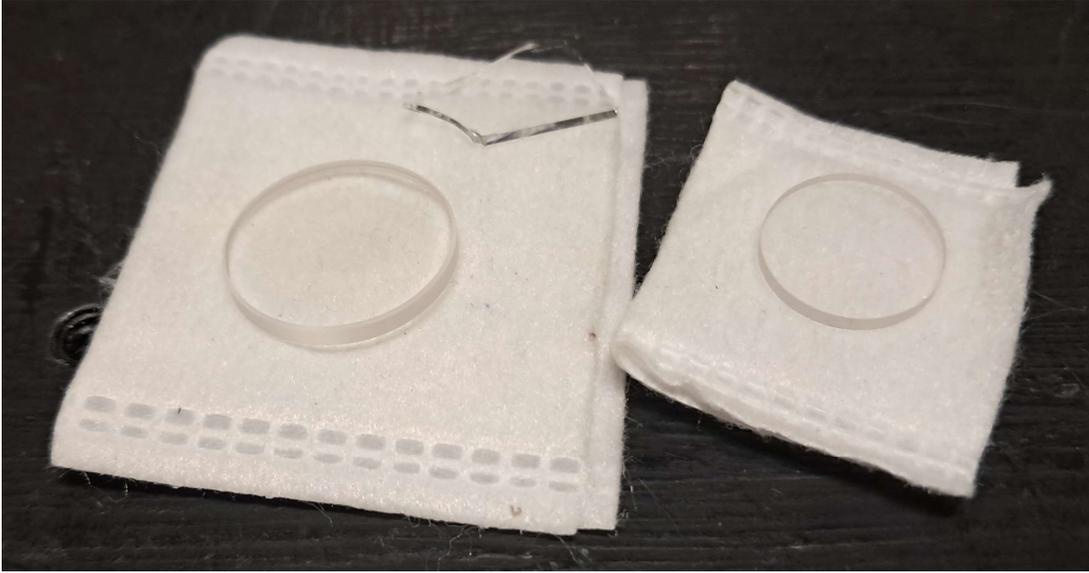


**Fibra y motor
con polarizador**

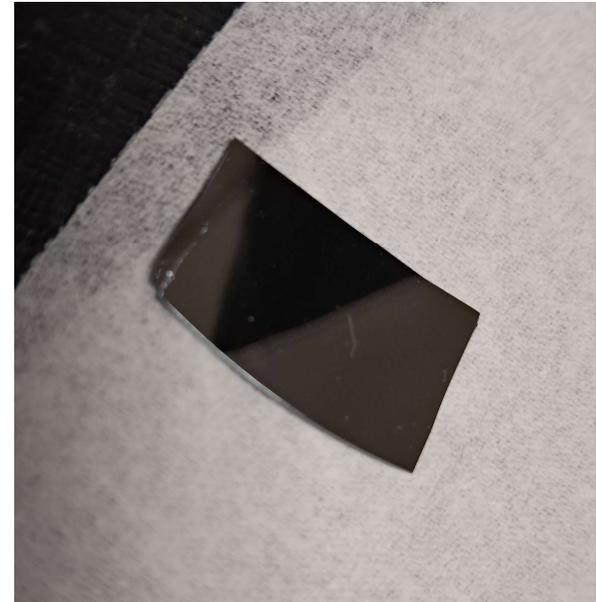
**Detector y motor
con polarizador**



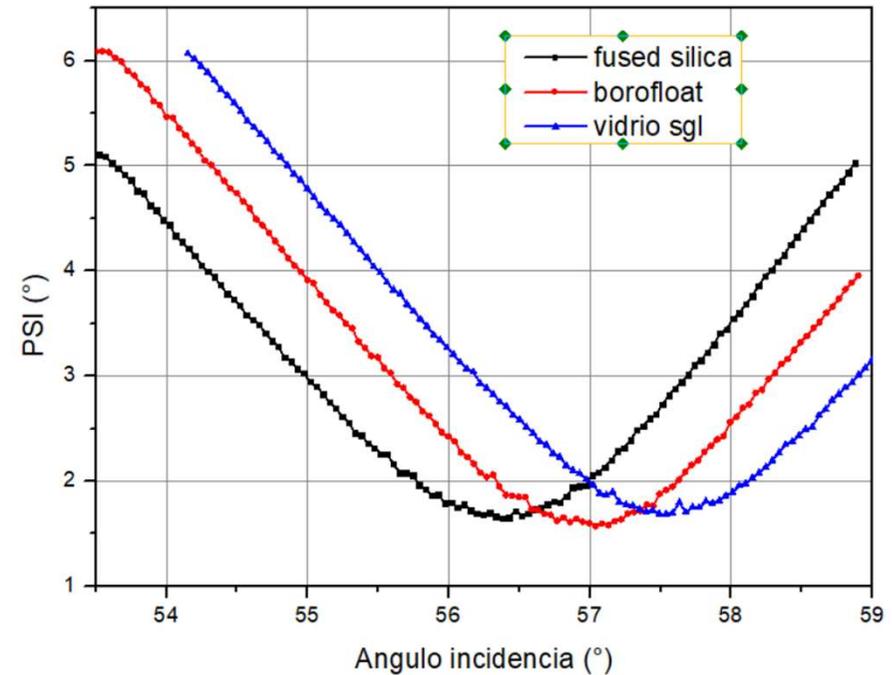
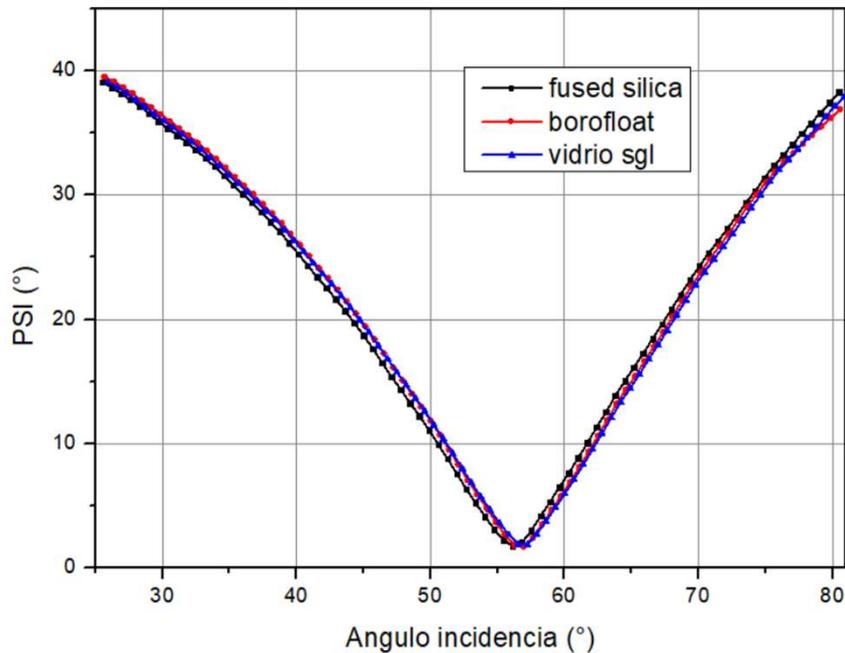
Medición del índice de refracción de diferentes vidrios



Medición del espesor de una película fina sobre un sustrato



Determinación del índice de refracción de diferentes vidrios a partir de la medida del ángulo ψ (o Δ)



Ajustando los datos experimentales con el coeficiente de reflexión R (cuya expresión se determina a través de los coeficientes de Fresnel, caso 1 visto anteriormente) se determina el coeficiente de refracción complejo.

Conociendo n y k del material, se deducen la constante dieléctrica y el coeficiente de absorción:

$$n = \sqrt{\epsilon}; k = \frac{\lambda}{4\pi} \alpha$$

Determinación del espesor de una película a partir de la medida del ángulo ψ (o Δ)

Sistema constituido por una película fina de SiO_2 sobre substrato de Si.
Se analizan 4 diferentes muestras fabricadas a diferentes temperaturas de diferente espesor

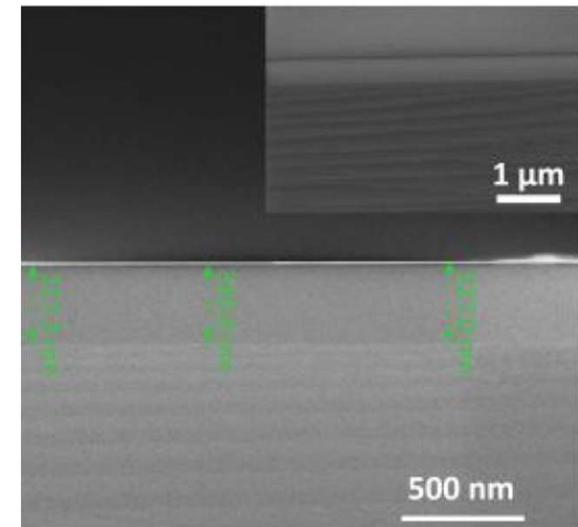
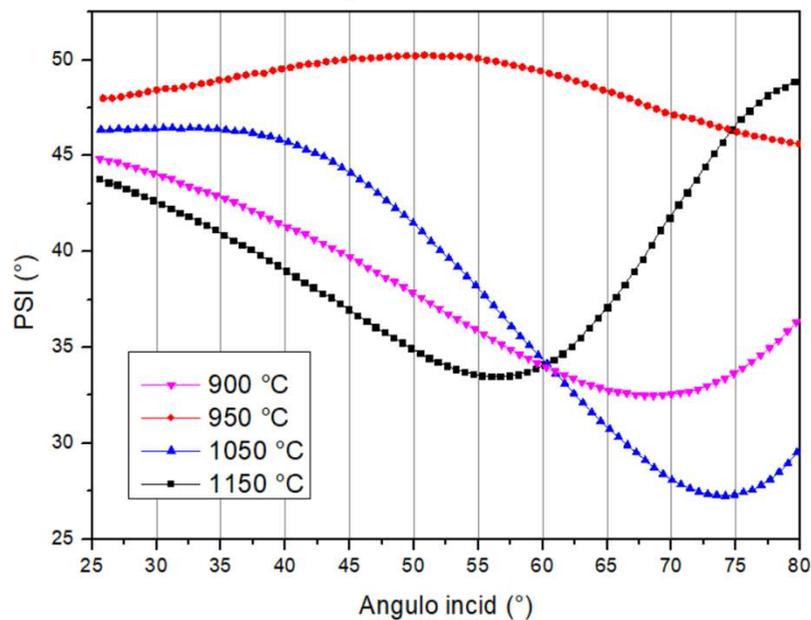


Imagen SEM sistema en estudio

Ajustando los datos experimentales con el coeficiente de reflexión R (cuya expresión se determina a través de los coeficientes de Fresnel, caso 2 visto anteriormente), se obtiene el espesor de la película

Características de nuestro elipsometro

- Funciona en las dos modalidades:
 - variando el ángulo de incidencia de la luz, dejando su la longitud de onda fija
 - analizando la respuesta en función de la longitud de onda de la luz con el ángulo de incidencia fijo.
- Exactitud en la medida del índice de refracción: orden del 2%
- Precisión en la medida del índice de refracción: mejor del 0.5%
- Respecto a la medida de espesor de una película fina, nuestras medidas fueron comparadas con medidas de espesor realizadas con otros métodos (absorbancia de la luz y microscopio electrónico SEM). La diferencia entre los valores de espesor obtenidos con los diferentes métodos es menor al 10 %
- La medida en función del ángulo, respecto a la medida en función de la longitud de onda, permite calcular directamente el coeficiente de refracción a partir del ángulo de Brewster, sin tener que aplicar algún modelo.

Bibliografía

- R.M.A. Azzam and N.M. Bashara, *Ellipsometry and polarized light*, eds. North Holland, Amsterdam, 1987
- H.G. Tompkins and E.A. Irene, *Handbook of ellipsometry*, eds. William Andrew Publishing, Inc. Springer, New York, 2005
- H. Fujiwara and Hiroyuki, *Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*, eds. Wiley and Sons, New York, 2007
- M. Mantia and T. Bixby, *Optical measurements on a budget: a 3D printed ellipsometer*, American Journal of Physics **99**, 445 (2022)
- J. Park, Y. J. Cho and W. Chegal, *Spectroscopic ellipsometry utilizing frequency division multiplexed lasers*, Nature Communications Physics **7**, 392 (2024)