

# POLARIZACIÓN CIRCULAR EN LA ZONA DE REFLEXIÓN TOTAL EN CRISTALES BIAXIALES

María C. Simon And Liliana I. Perez

Laboratorio de Óptica – Departamento de Física – Facultad de Ciencias Exactas y Naturales –  
Universidad de Buenos Aires- CONICET  
Av. Güiraldes S/Nº - (1428) –Buenos Aires- Argentina  
e-mail: lperez@df.uba.ar

En este trabajo se determinan las condiciones de luz reflejada circularmente polarizada cuando la luz que incide sobre una interfaz formada por un medio isótropo y un cristal biaxial dieléctricos está linealmente polarizada. Se consideran los casos en que el plano de incidencia sea uno de los planos principales. Se analiza también la posibilidad de obtener luz linealmente polarizada cuando el ángulo de incidencia es mayor que ambos ángulos de reflexión total y se comparan los resultados con los obtenidos para interfaces donde el segundo medio es uniaxial.

In this paper we determine the necessary conditions to obtain circularly reflected light when linearly polarised light is incident on an interface formed by a dielectric isotropic medium and biaxial crystal and the plane of incidence is a principal plane. We also analyse the possibility in obtaining linearly polarised reflected light when the angle of incidence is greater than both angles of total reflection. We compare the obtained results with those of interfaces formed by an isotropic medium and a uniaxial crystal.

## I. INTRODUCCIÓN

Cuando en la interfaz entre dos medios dieléctricos isótropos o un medio isótropo y un cristal uniaxial incide luz linealmente polarizada de modo tal que se produzca el fenómeno de reflexión total, la luz reflejada está, en general, elípticamente polarizada<sup>(1,2,3,4)</sup>. En otros trabajos anteriores se estudió la posibilidad de obtener luz circularmente polarizada en estas interfaces<sup>(5,6)</sup>. En los mismos analizamos la variación de las fases de las componentes de la luz reflejada en la zona de reflexión total cuando la interfaz está formada por un medio isótropo y un cristal uniaxial, y el plano de incidencia es un plano principal del cristal. Se encontró que, a semejanza de lo que ocurre cuando ambos medios son isótropos, pueden existir dos ángulos de incidencia para los cuales la luz reflejada está circularmente polarizada: uno mayor que los ángulos de reflexión total ordinaria y extraordinaria, y otro comprendido entre ellos. Se ha encontrado además una propiedad que no se aparece en interfaces isótropas: la posibilidad de encontrar condiciones de incidencia para las cuales la polarización del rayo reflejado sea la misma que la del rayo incidente. Esto resulta posible para cierto ángulo de incidencia mayor que ambos ángulos de reflexión total. Como consecuencia de esto es posible obtener, en condiciones de reflexión total, a partir de luz incidente linealmente polarizada en cierta dirección, luz reflejada linealmente polarizada en la misma dirección.

Por otra parte también se han calculado los coeficientes de reflexión para el caso en que el segundo medio sea biaxial y se han estudiado las propiedades generales de las ondas reflejada y refractadas para el caso de reflexión total<sup>(7,8,9)</sup>. Cuando se considera una interfaz formada por un medio isótropo y un cristal birrefringente biaxial aparecen dos rayos refractados que, como en el caso de cristales uniaxiales, dan lugar a

dos ángulos de reflexión total distintos. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con los cristales uniaxiales, ambos ángulos dependen no sólo de los índices de refracción del cristal sino también del plano de incidencia considerado. En este trabajo se determinan las condiciones necesarias para que la luz reflejada esté circularmente polarizada para los casos en que el plano de incidencia sea uno de los planos principales, y se analiza también la posibilidad de obtener luz linealmente polarizada cuando el ángulo de incidencia es mayor que ambos ángulos de reflexión total.

## II. PLANOS PRINCIPALES, PLANOS DE INCIDENCIA Y VELOCIDADES DE FASE

Consideramos una superficie de discontinuidad entre un medio isótropo y un cristal biaxial tal que el plano de incidencia sea un plano principal. Bajo estas condiciones uno de los ejes principales  $z_j$  debe ser paralelo a la interfaz y una de las velocidades de fase resulta constante. Los campos eléctricos correspondientes a cada una de las dos ondas refractadas serán paralelo y perpendicular al correspondiente plano principal. Las fórmulas se asemejan a las correspondientes a cristales uniaxiales, pero como en este caso hay tres planos principales, el comportamiento no es exactamente el mismo.

Sin pérdida de generalidad podemos considerar que las velocidades principales del cristal cumplen la relación

$$u_1 < u_2 < u_3 \quad (1)$$

En consecuencia si consideramos que la velocidad de fase independiente de la dirección de la onda es  $u_3$ , el plano de incidencia será el  $z_1z_2$ , y si lo es  $u_1$  el plano de incidencia corresponde al plano principal  $z_2z_3$ . Así el plano principal que contiene a los ejes ópticos será el

$z_1z_3$  y la velocidad independiente de la dirección de propagación será  $u_2$  (figuras 1a, 2a y 3a). Como es bien sabido<sup>(7)</sup>, en todos los casos, la normal al frente de ondas  $\tilde{N}'$  cuya velocidad de fase es independiente de la dirección de propagación ( $u'$ ) coincide con la dirección del rayo asociado  $\tilde{R}'$ . Para la onda cuya velocidad de fase  $u''$  depende de la dirección de propagación de la onda  $\tilde{N}''$ , la dirección de la normal al frente de ondas correspondiente no coincide con la dirección de propagación de la energía  $\tilde{R}''$ . En las figuras 1b, 2b y 3b se muestran los tres planos de incidencia considerados y algunas de las características de las ondas incidente, reflejada y refractadas en la interfaz.

### III. LUZ CIRCULAR Y LINEALMENTE POLARIZADA EN LA ZONA DE REFLEXIÓN TOTAL

Como es bien sabido, las condiciones que se deben cumplir para que la luz reflejada en una interfaz esté circularmente polarizada son dos: el desfase entre las componentes paralela y perpendicular al plano de incidencia debe ser  $\pm\pi/2$  y las amplitudes de ambas componentes deben ser iguales. En el caso en que la interfaz esté formada por dos medios isotropos dieléctricos de índices de refracción  $n$  y  $n'$ , se puede obtener luz reflejada circularmente polarizada para dos ángulos de incidencia mayores que el de reflexión total y si la relación de índices es mayor que el del diamante ( $n/n' > 1 + \sqrt{2}$ )<sup>(1)</sup>. En el caso en que el segundo medio sea un medio birrefringente uniaxial y se considere que el plano de incidencia es un plano principal, también se pueden obtener dos ángulos de incidencia para los cuales la luz reflejada esté circularmente polarizada: uno mayor que ambos ángulos de reflexión total y otro comprendido entre ambos<sup>(5,6)</sup>. Para el primer ángulo es necesario que el rayo incidente esté polarizado a  $45^\circ$  respecto del plano de incidencia, mientras que para el segundo la polarización del rayo incidente tiene que compensar la polarización del rayo refractado que subsiste. Por otra parte, como la diferencia entre los ángulos de reflexión total aumenta si disminuye el valor del índice de refracción del medio isotropo (siempre que éste sea mayor que los índices principales del cristal), resulta que para obtener luz circularmente polarizada conviene disminuir el valor del índice del medio isotropo en lugar de aumentarlo, como sucede en interfaces isotropas. Cuando el plan de incidencia contiene al eje óptico del cristal, es posible, además usar otro recurso que consiste en aumentar el ángulo entre el eje óptico y la superficie de separación. Por otra parte, también se ha encontrado en interfaces isotropo-uniaxial dieléctricos que bajo ciertas condiciones es posible obtener luz reflejada linealmente polarizada en la zona de reflexión total.

Analizaremos aquí la posibilidad de obtener luz circular y linealmente polarizada para el caso en que la interfaz

esté formada por un medio isotropo y un cristal biaxial tal que el plano de incidencia sea un plano principal y el índice del medio isotropo sea mayor que los tres índices principales del cristal. Consideraremos los tres casos por separado.

#### III.1 Plano de incidencia $z_1z_2$

En este caso la velocidad de fase constante es  $u_3$  y la otra,  $u''$ , está dada por

$$u''^2 = u_1^2 + (u_2^2 - u_1^2)(\tilde{N}'' \cdot \tilde{z}_1)^2 \quad (2)$$

donde  $\tilde{z}_1$  es el eje principal que forma un ángulo  $\vartheta_1$  con la interfaz (figura 1a, 1b). Como en el caso en que el plano de incidencia sea un plano principal los modos están separados, las componentes paralela y perpendicular al plano de incidencia del campo de la onda reflejada están dadas por

$$\begin{pmatrix} E_s^* \\ E_p^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{ss} & 0 \\ 0 & R_{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_s \\ E_p \end{pmatrix} \quad (3)$$

con

$$R_{ss} = \frac{\cos\alpha - \sqrt{\text{sen}^2\alpha_T' - \text{sen}^2\alpha}}{\cos\alpha + \sqrt{\text{sen}^2\alpha_T' - \text{sen}^2\alpha}} \quad (4)$$

$$R_{pp} = \frac{-n_1n_2\cos\alpha + n^2\sqrt{\text{sen}^2\alpha_T'' - \text{sen}^2\alpha}}{n_1n_2\cos\alpha + n^2\sqrt{\text{sen}^2\alpha_T'' - \text{sen}^2\alpha}} \quad (5)$$

siendo

$$\text{sen}\alpha_T' = n_3/n \quad (6)$$

y

$$\text{sen}\alpha_T'' = \frac{1}{n} \sqrt{n_1^2 \text{sen}^2\vartheta_1 + n_2^2 \cos^2\vartheta_1} \quad (7)$$

los ángulos límite de reflexión total. En la figura 1c se grafican los ángulos de reflexión total en función del ángulo  $\vartheta_1$  para una interfaz vidrio- ..... ( $n=1.600$ ,  $n_1=1.588$ ,  $n_2=1.582$ ,  $n_3=1.552$ ). Se observa que siempre es  $\alpha_T'' > \alpha_T'$  y que para ningún  $\vartheta_1$  los ángulos de reflexión total coinciden.

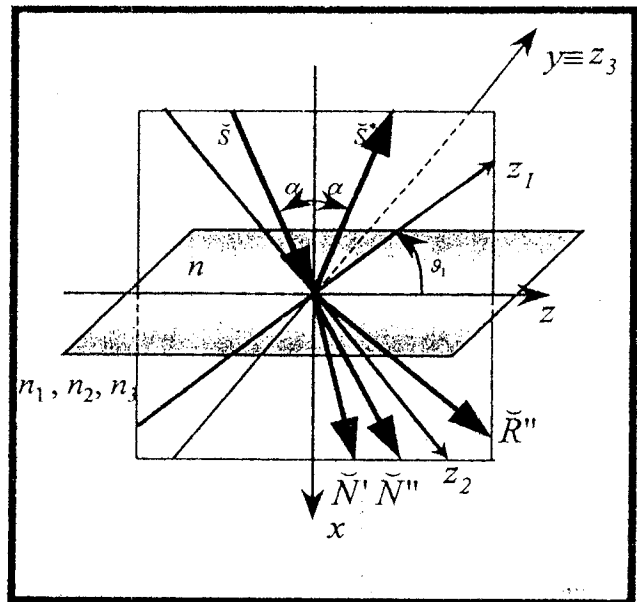
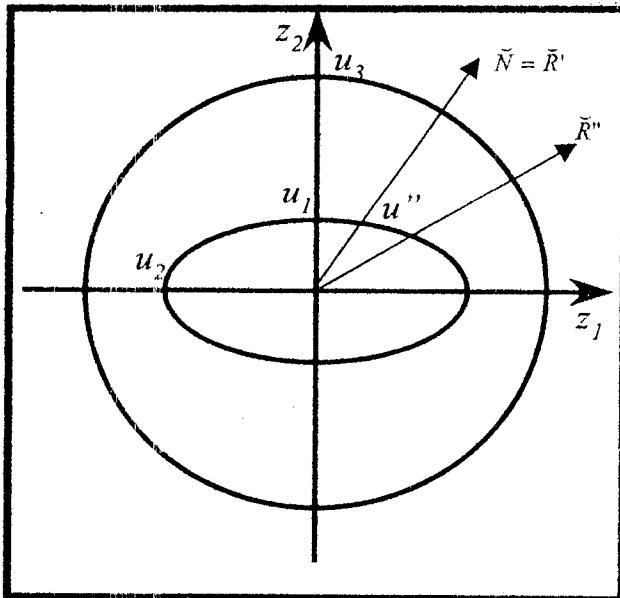
Cuando el ángulo de incidencia es mayor que  $\alpha_T'$  el coeficiente de reflexión  $R_{pp}$  (5) es real mientras que  $R_{ss}$  (4) resulta complejo, de forma tal que se puede escribir

$$R_{ss} = e^{i\eta_{ss}} \quad (8)$$

$$\eta_{ss} = -2 \arctg \left( \frac{\sqrt{\text{sen}^2\alpha - \text{sen}^2\alpha_T'}}{\cos\alpha} \right) \quad (9)$$

y cuando  $\alpha > \alpha_T''$  ambos coeficientes de reflexión son complejos, siendo entonces

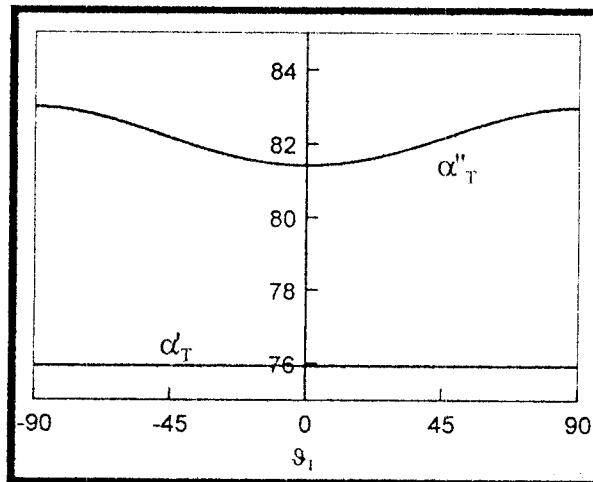
$$R_{pp} = e^{i\eta_{pp}} \quad (10)$$



a)

b)

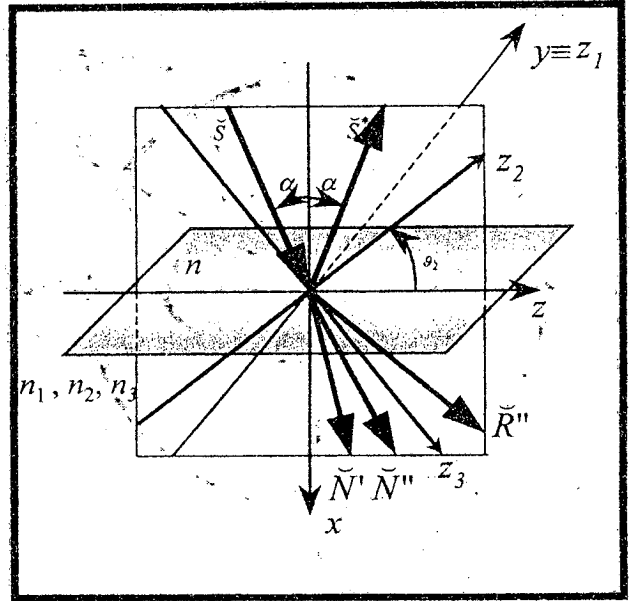
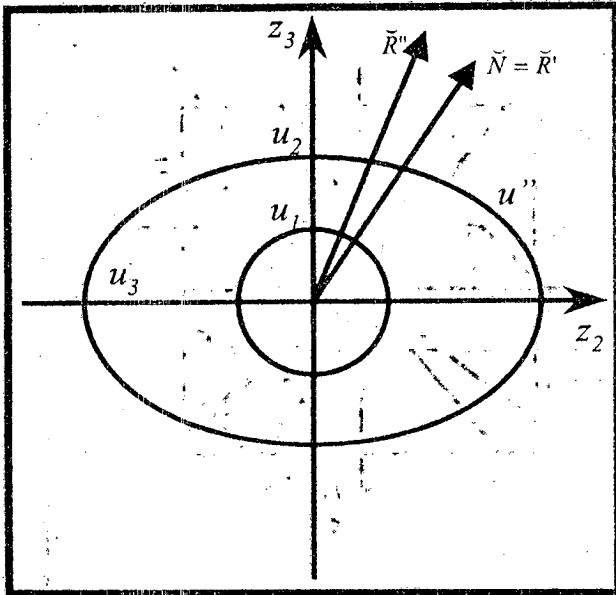
$u' = u_3$	$u''^2 = u_1^2 (\tilde{N} \cdot \tilde{z}_2)^2 + u_2^2 (\tilde{N} \cdot \tilde{z}_1)^2$
$\tilde{R}' = \tilde{N}$	$R'' = \frac{1}{f_n} \{ u_2^2 (\tilde{N} \cdot \tilde{z}_1)^2 \tilde{z}_1 + u_1^2 (\tilde{N} \cdot \tilde{z}_2)^2 \tilde{z}_2 \}$



c)

$\text{sen } \alpha_T' = n_3/n$	$\text{sen } \alpha_T'' = \frac{1}{n} \sqrt{n_1^2 (\tilde{z}_1 \cdot \tilde{x})^2 + n_2^2 (\tilde{z}_2 \cdot \tilde{x})^2}$
---------------------------------	---

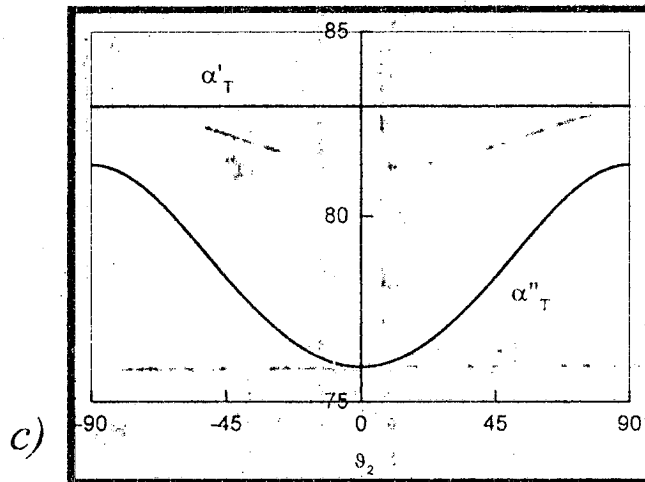
Figura 1: Plano principal  $z_1 z_2$ . a) Ejes principales y velocidades de fase b) Plano de incidencia, características de la interfaz y de las ondas incidente, reflejada y refractadas c) Ángulos de reflexión total en función del ángulo que forma el eje principal  $z_1$  con la interfaz



a)

$u' = u_3$	$u''^2 = u_2^2 (\tilde{N} \cdot \tilde{z}_3)^2 + u_3^2 (\tilde{N} \cdot \tilde{z}_2)^2$
$\tilde{R}' = \tilde{N}$	$R'' = \frac{1}{f_n} \{ u_3^2 (\tilde{N} \cdot \tilde{z}_2)^2 \tilde{z}_2 + u_2^2 (\tilde{N} \cdot \tilde{z}_3)^2 \tilde{z}_3 \}$

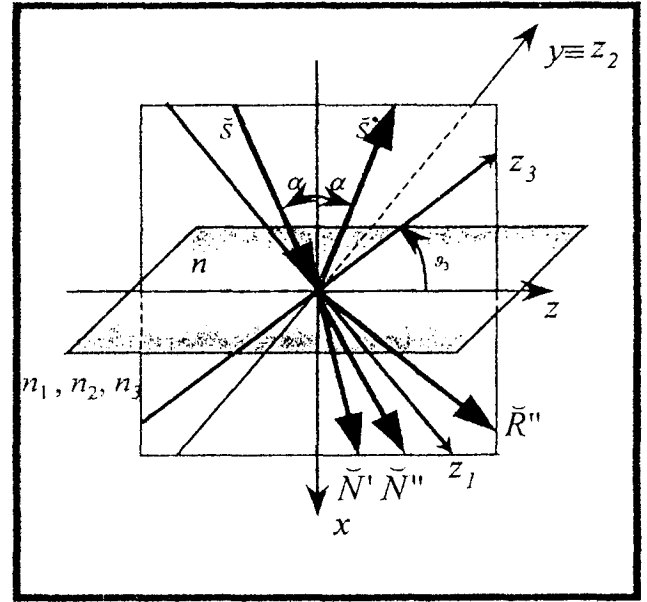
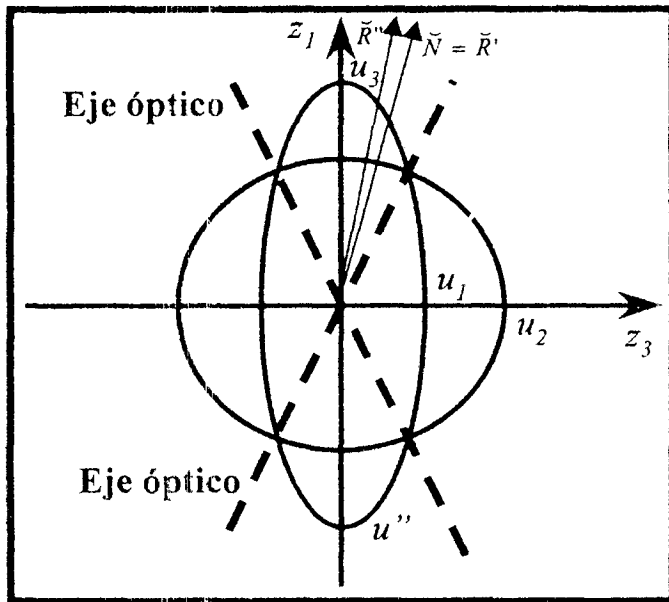
b)



c)

$\text{sen } \alpha_T' = n_1/n$	$\text{sen } \alpha_T'' = \frac{1}{n} \sqrt{n_2^2 (\tilde{z}_2 \cdot \tilde{x})^2 + n_3^2 (\tilde{z}_3 \cdot \tilde{x})^2}$
---------------------------------	---

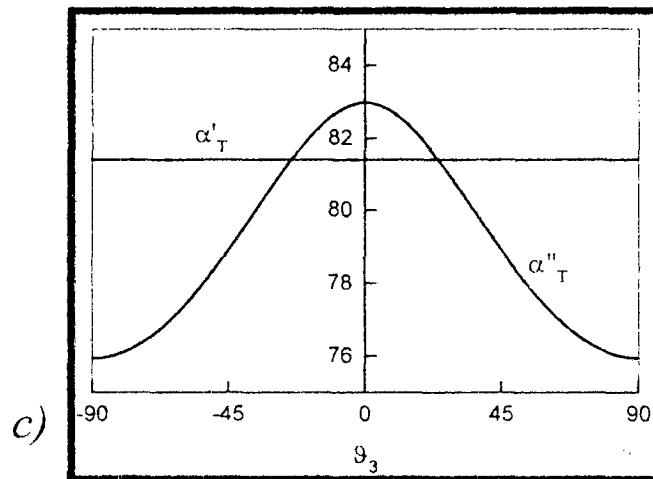
Figura 2: Plano principal  $z_2 z_3$ . a) Ejes principales y velocidades de fase b) Plano de incidencia, características de la interfaz y de las ondas incidente, reflejada y refractadas c) Ángulos de reflexión total en función del ángulo que forma el eje principal  $z_1$  con la interfaz



a)

b)

$u' = u_2$	$u''^2 = u_1^2 (\tilde{N} \cdot \tilde{z}_3)^2 + u_3^2 (\tilde{N} \cdot \tilde{z}_1)^2$
$\tilde{R}' = \tilde{N}$	$R'' = \frac{1}{f_n} \left\{ u_3^2 (\tilde{N} \cdot \tilde{z}_1)^2 \tilde{z}_1 + u_1^2 (\tilde{N} \cdot \tilde{z}_3)^2 \tilde{z}_3 \right\}$



$\text{sen } \alpha_T' = n_2/n$	$\text{sen } \alpha_T'' = \frac{1}{n} \sqrt{n_1^2 (\tilde{z}_1 \cdot \tilde{x})^2 + n_3^2 (\tilde{z}_3 \cdot \tilde{x})^2}$
---------------------------------	---

Figura 3: Plano principal  $z_1 z_3$ . a) Ejes principales y velocidades de fase b) Plano de incidencia, características de la interfaz y de las ondas incidente, reflejada y refractadas c) Ángulos de reflexión total en función del ángulo que forma el eje principal  $z_1$  con la interfaz

y

$$\eta_{pp} = -2 \operatorname{arctg} \left( \frac{n^2 \sqrt{\sin^2 \alpha - \sin^2 \alpha_T''}}{n_1 n_2 \cos \alpha} \right) \quad (11)$$

En la figura 4 se representan los módulos y fases de los coeficientes de reflexión para esta interfaz cuando  $\vartheta_1 = 45^\circ$

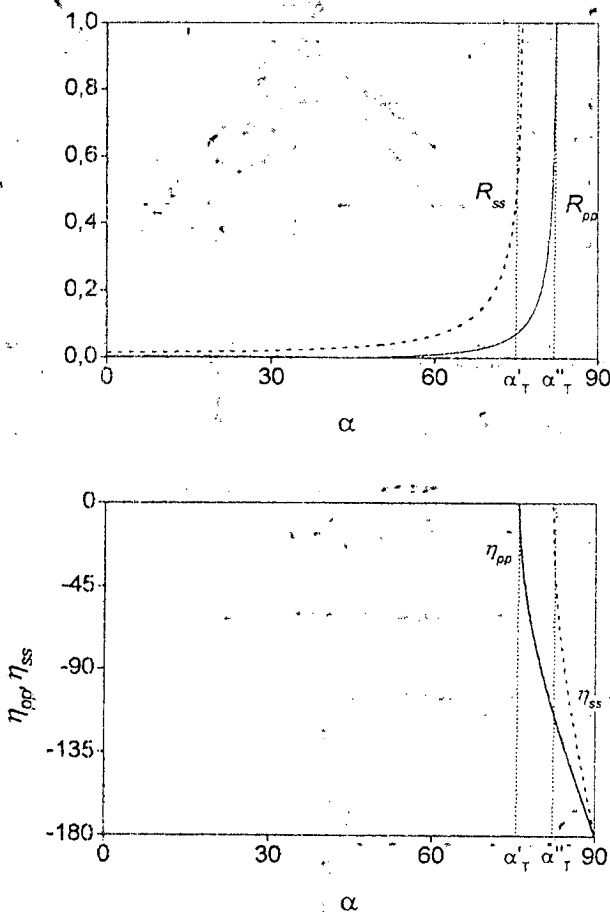


Figura 4: Módulos y coeficientes de reflexión para el plano principal  $z_1 z_2$  ( $n=1.6$ ,  $n_1=1.588$ ,  $n_2=1.582$ ,  $n_3=1.552$  y  $\vartheta=45^\circ$ )

Como para este plano de incidencia es  $\alpha_T' < \alpha_T''$ , la relación entre las componentes perpendicular y paralela al plano de incidencia de la onda reflejada está dada por

$$\frac{E_s^*}{E_p^*} = \frac{n_1 n_2 \cos \alpha + n^2 \sqrt{\sin^2 \alpha_T'' - \sin^2 \alpha}}{n_1 n_2 \cos \alpha - n^2 \sqrt{\sin^2 \alpha_T'' - \sin^2 \alpha}} \exp(i\eta_{ss}) \frac{E_s}{E_p} \quad (12)$$

si  $\alpha_T' < \alpha < \alpha_T''$ , y

$$\frac{E_s^*}{E_p^*} = e^{i(\eta_{ss} - \eta_{pp})} \frac{E_s}{E_p} \quad (13)$$

si  $\alpha > \alpha_T', \alpha_T''$ .

En el primer caso se podrá obtener luz circularmente polarizada si la polarización del haz incidente es tal que

$$\frac{E_s}{E_p} = \frac{n_1 n_2 \cos \alpha - n^2 \sqrt{\sin^2 \alpha_T'' - \sin^2 \alpha}}{n_1 n_2 \cos \alpha + n^2 \sqrt{\sin^2 \alpha_T'' - \sin^2 \alpha}} \quad (14)$$

mientras que si el ángulo de incidencia es mayor que ambos ángulos de reflexión total, se podrá obtener luz reflejada circularmente polarizada sólo si

$$\frac{E_s}{E_p} = 1 \quad (15)$$

En la figura 5 se representan las fases y diferencias de fase para distintos direcciones del eje principal respecto de la superficie de separación. En ella se observa que para los índices principales de refracción elegidos la luz reflejada puede estar elíptica o circularmente polarizada para ángulos de incidencia mayores que  $\alpha_T'$ , excepto cuando  $\alpha = 90^\circ$  para el que la luz reflejada resulta linealmente polarizada. Además, se obtienen dos ángulos de incidencia para los cuales la luz está circularmente polarizada (uno mayor que ambos ángulos de reflexión total y otro comprendido entre ellos) para todos los valores de  $\vartheta_1$ . Por otra parte, eligiendo adecuadamente las características de la interfaz, se puede encontrar un ángulo de incidencia  $\alpha_{L12}$  en la zona de reflexión total para el cual la luz reflejada resulta de la misma polarización que la de la luz incidente ( $\eta_{pp} - \eta_{ss} = 0, \pi$ ).

En particular si la luz incidente es lineal, se puede obtener luz reflejada linealmente polarizada en la zona de reflexión total (figura 6). A partir de (9) y (11) se obtiene que esta situación aparece cuando vale para el ángulo de incidencia que

$$\sin^2 \alpha_{L12} = \frac{n^4 \sin^2 \alpha_T'' - n_1^2 n_2^2 \sin^2 \alpha_T'}{n^4 - n_1^2 n_2^2} \quad (16)$$

Para que se cumpla esta condición es necesario que  $\alpha_T'' > \alpha_T'$ , lo cual se cumple para este plano principal. Comparando los resultados con los obtenidos para cristales uniaxiales<sup>(6)</sup> observamos que en este plano de incidencia se obtienen resultados análogos a los correspondientes a cristales uniaxiales positivos cuando el eje óptico está contenido en el plano de incidencia.

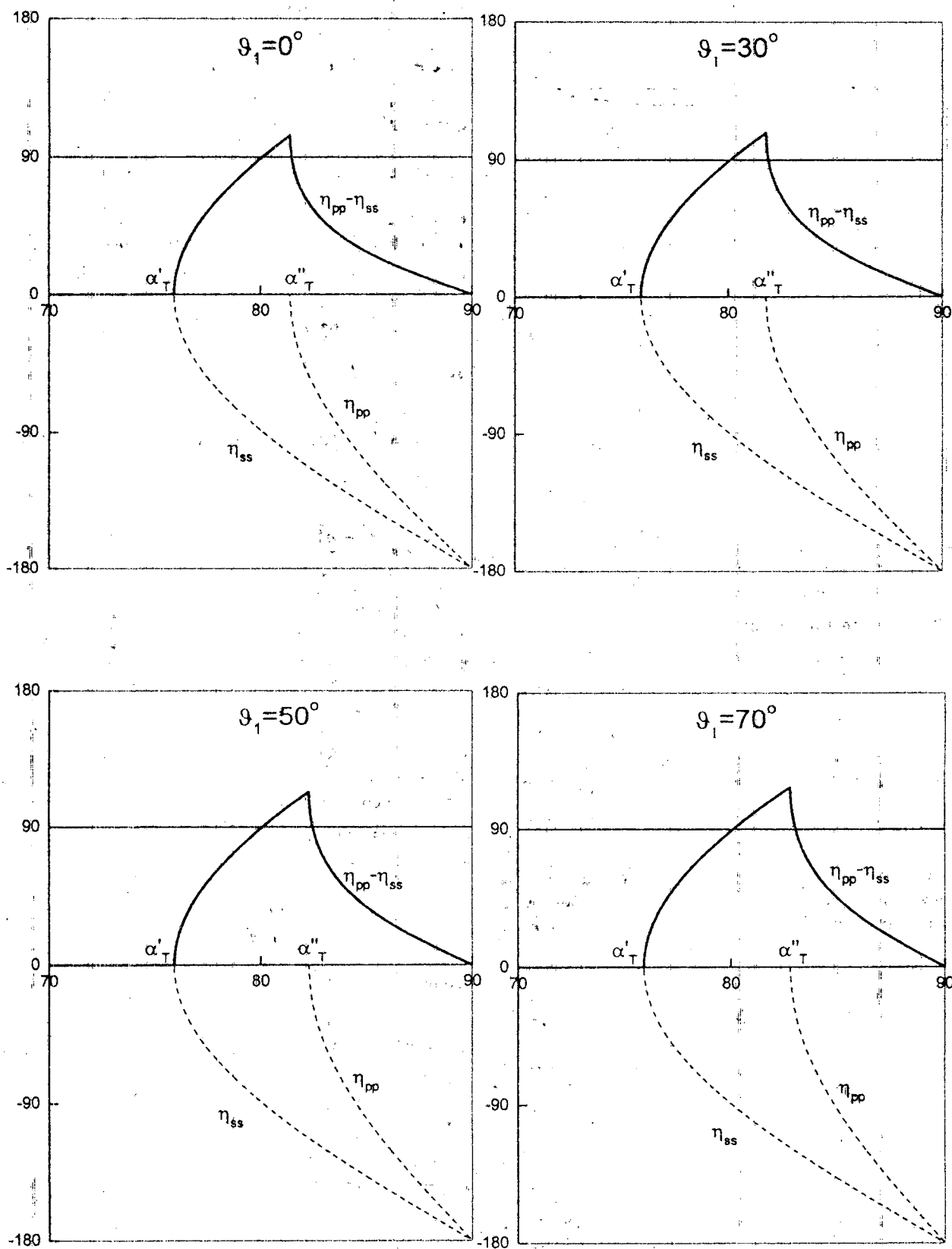


Figura 5: Fases y diferencias de fase de los modos p y s cuando el plano principal es el  $z_1z_2$  para distintos valores de  $\theta_1$  ( $n=1.6$ ,  $n_1=1.588$ ,  $n_2=1.582$ ,  $n_3=1.552$ )

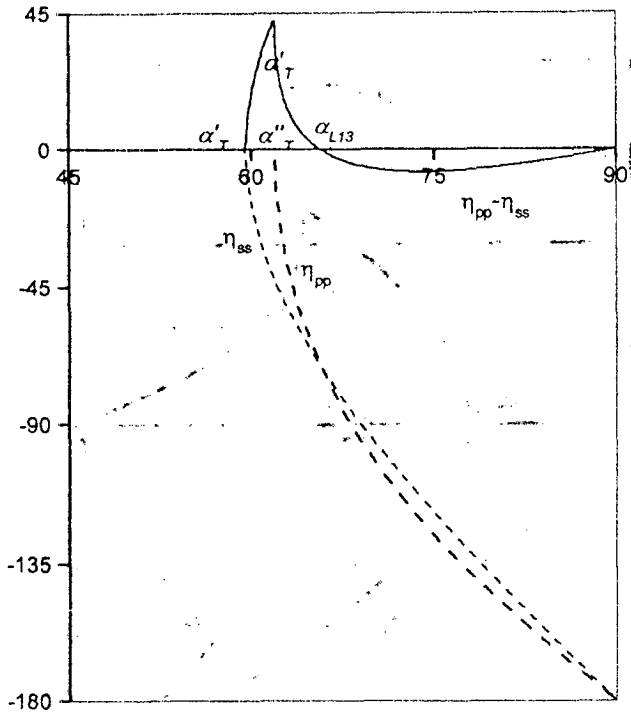


Figura 6: Fases y diferencias de fase para los modos  $p$  y  $s$  cuando el plano de incidencia es el  $z_1z_2$  ( $n=1.800$ ,  $n_1=1.588$ ,  $n_2=1.582$ ,  $n_3=1.552$ ,  $\vartheta_1=10^\circ$ )

### III.2 Plano de incidencia $z_2z_3$

Este caso está representado en la figura 2. La velocidad de fase constante es  $u_1 = \frac{c}{n_1}$ , y como por (1) es  $n_1 > n_2 > n_3$ , es de esperar un comportamiento similar al de los medios uniaxiales negativos cuando el eje óptico está en el plano de incidencia. En efecto, en este caso el ángulo de reflexión total  $\alpha_T$  es siempre mayor que  $\alpha_T''$  (figura 2c). También se pueden obtener dos ángulos de incidencia para los cuales la polarización de la luz reflejada es circular siendo la polarización de la luz incidente lineal (figura 7). Las condiciones que se obtienen son equivalentes a las del plano de incidencia  $z_1z_2$ , reemplazando  $n_1$  por  $n_3$  y  $n_3$  por  $n_1$ . Sin embargo, en este caso no se puede obtener luz reflejada con la misma polarización que la incidente en la zona de reflexión total. En efecto, de la condición  $\eta_{pp} - \eta_{ss} = 0, \pi$  surge en este caso que el ángulo de incidencia estaría dado por la ecuación

$$\text{sen}^2 \alpha = \frac{n^4 \text{sen}^2 \alpha_T'' - n_2^2 n_3^2 \text{sen}^2 \alpha_T'}{n^4 - n_2^2 n_3^2} \quad (17)$$

que no cumple con la condición de ser mayor que ambos ángulos de reflexión total. Este comportamiento es equivalente al que se encuentra en interfaces formadas por un medio isotrópico y un cristal uniaxial negativo cuando el eje óptico está contenido en el plano de incidencia, lo cual es coherente con el hecho que a la

onda cuya velocidad de fase es constante le corresponde el índice principal  $n_1$  (que es mayor que los otros dos).

### III.2 Plano de incidencia $z_1z_3$

Este plano de incidencia no es comparable con el plano que contiene al eje óptico en el caso de cristales uniaxiales, ya que a la onda cuya velocidad de fase es constante le corresponde el índice principal intermedio. Esto da lugar a que éste sea el plano que contiene a los ejes ópticos, ya que hay dos direcciones para las cuales  $u' = u''$  (figura 3a, 3b). Otra consecuencia es que la relación entre  $\alpha_T$  y  $\alpha_T''$  depende del ángulo  $\vartheta_3$ , es decir de la orientación del eje principal  $z_3$  respecto de la superficie de separación (figura 3c). Como

$$\text{sen} \alpha_T = n_2 / n \quad (18)$$

y

$$\text{sen} \alpha_T'' = \frac{1}{n} \sqrt{n_3^2 \text{sen}^2 \vartheta_3 + n_1^2 \text{cos}^2 \vartheta_3} \quad (19)$$

es  $\alpha_T'' > \alpha_T$  si

$$\text{sen}^2 \vartheta_3 < \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_3^2} \quad (20)$$

En la figura 8 se muestran las fases y diferencias de fase entre los modos propios de polarización. Se observa que, dependiendo de las características de la interfaz se pueden obtener uno o dos ángulos de incidencia para los cuales la polarización es circular. Como es sabido para interfaces isotrópico-uniaxial con el eje óptico en el plano de incidencia, cuando existe un solo ángulo, éste corresponde a uno de los ángulos de reflexión total. En esta geometría esto equivale a  $\eta_{pp} = -\pi/2$ . Haciendo estas consideraciones se obtiene que existe un solo ángulo de polarización circular si

$$\text{sen}^2 \vartheta_{31} = \frac{n^4 (n_1^2 - n_2^2) + n_1^2 n_3^2 (n^2 - n_2^2)}{n^4 (n_1^2 - n_3^2)} \quad (21)$$

Como

$$\eta_{ss} = -2 \arctg \left( \frac{\sqrt{\text{sen}^2 \alpha - \text{sen}^2 \alpha_T'}}{\text{cos} \alpha} \right) \quad (22)$$

y

$$\eta_{pp} = -2 \arctg \left( \frac{n^2 \sqrt{\text{sen}^2 \alpha - \text{sen}^2 \alpha_T''}}{n_1 n_3 \text{cos} \alpha} \right) \quad (23)$$

resulta además que se puede obtener luz reflejada linealmente polarizada en la zona de reflexión total si el ángulo de incidencia cumple



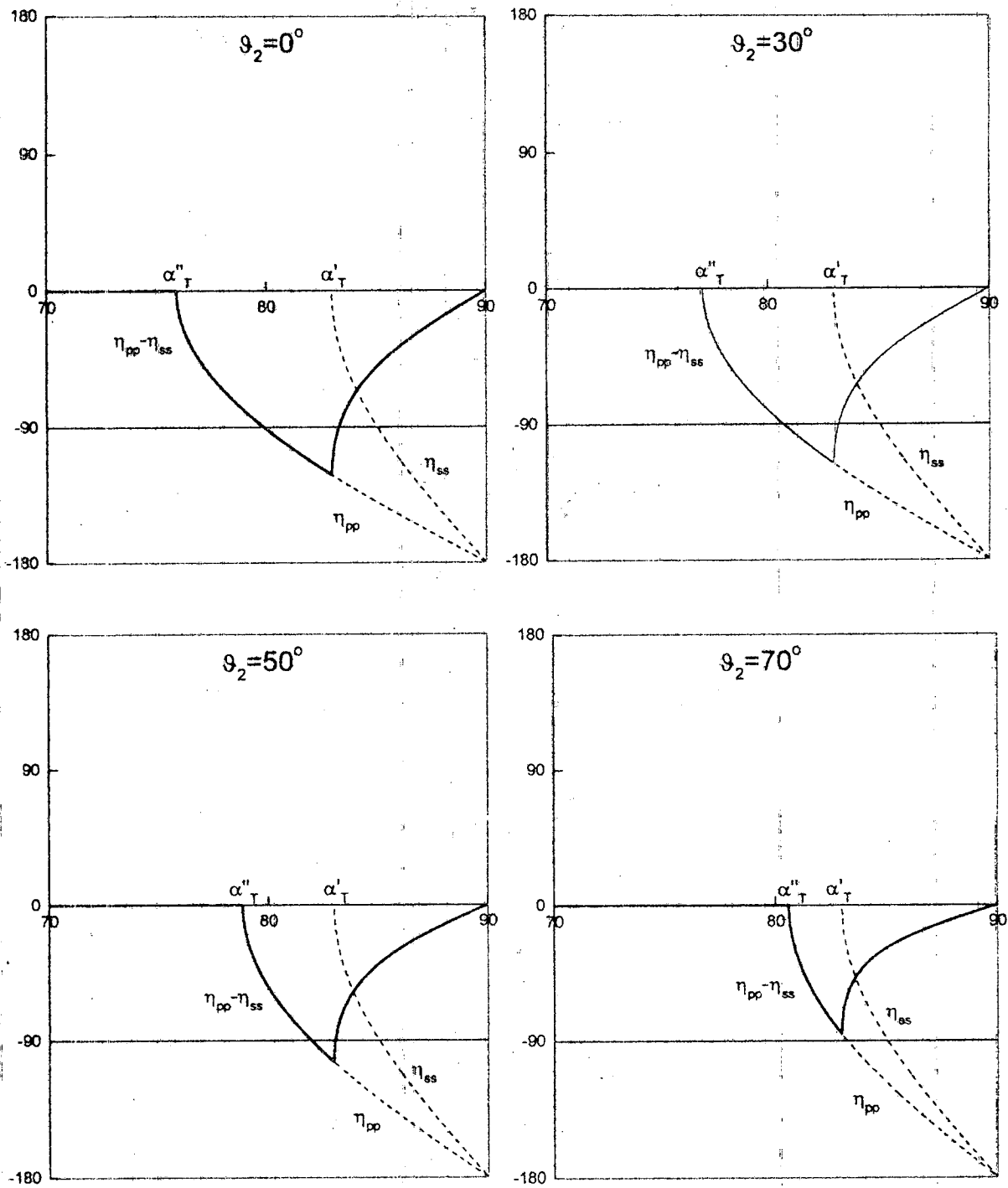


Figura 7: Fases y diferencias de fase de los modos p y s cuando el plano principal es el  $z_2 z_3$  para distintos valores de  $\vartheta_2$  ( $n=1.6$ ,  $n_1=1.588$ ,  $n_2=1.582$ ,  $n_3=1.552$ )

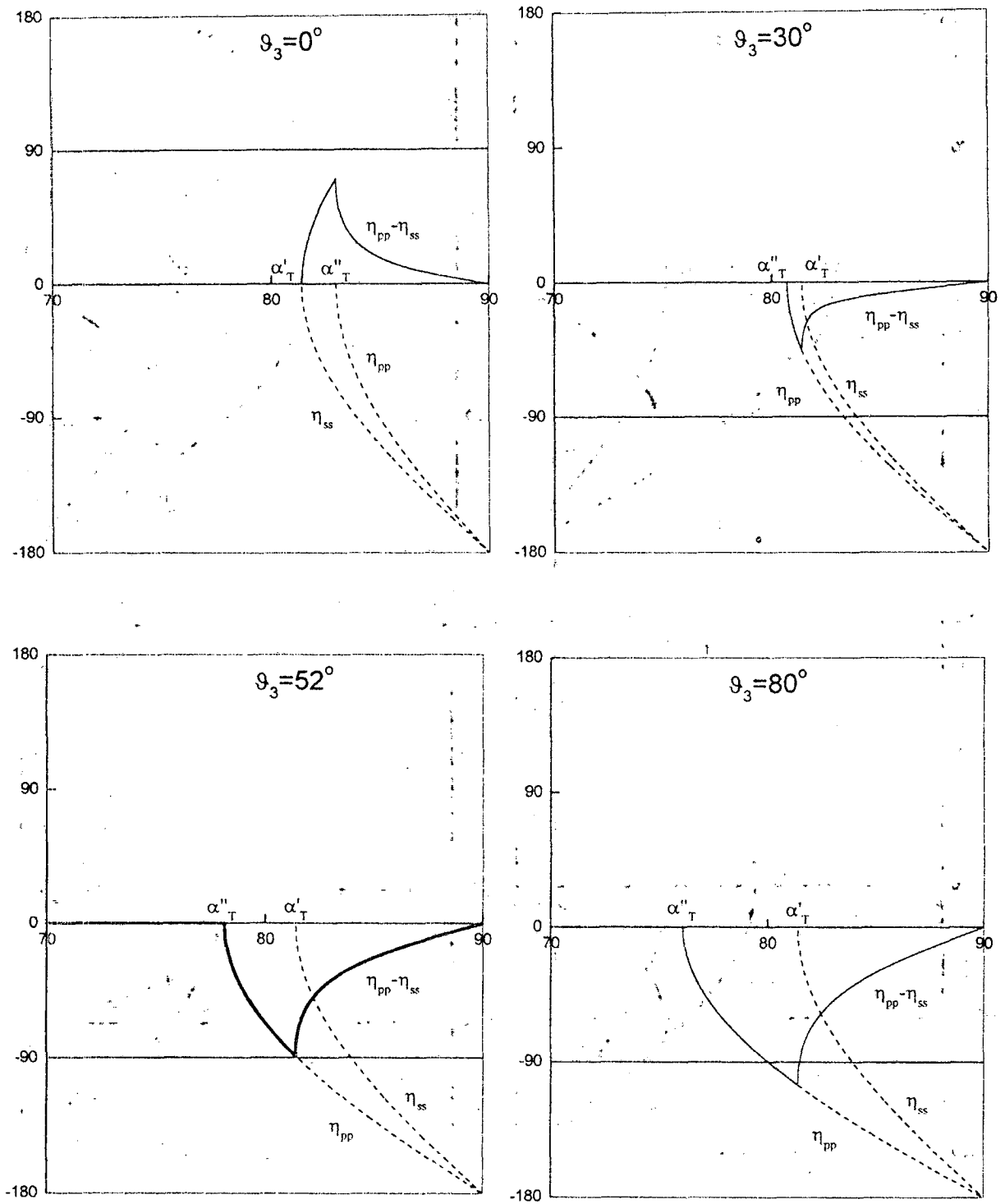


Figura 8: Fases y diferencias de fase de los modos p y s cuando el plano principal es el  $z_1 z_3$  para distintos valores de  $\theta_3$  ( $n=1.6$ ,  $n_1=1.588$ ,  $n_2=1.582$ ,  $n_3=1.552$ )

$$\sin^2 \alpha_{L13} = \frac{n_1^2 (n^4 - n_2^2 n_3^2) - n^4 (n_1^2 - n_3^2) \sin^2 \vartheta_3}{n^2 (n^4 - n_1^2 n_3^2)} \quad (24)$$

En la figura 9 se muestran las fases y diferencia de fases para una interfaz para la cual se puede obtener luz reflejada linealmente polarizada.

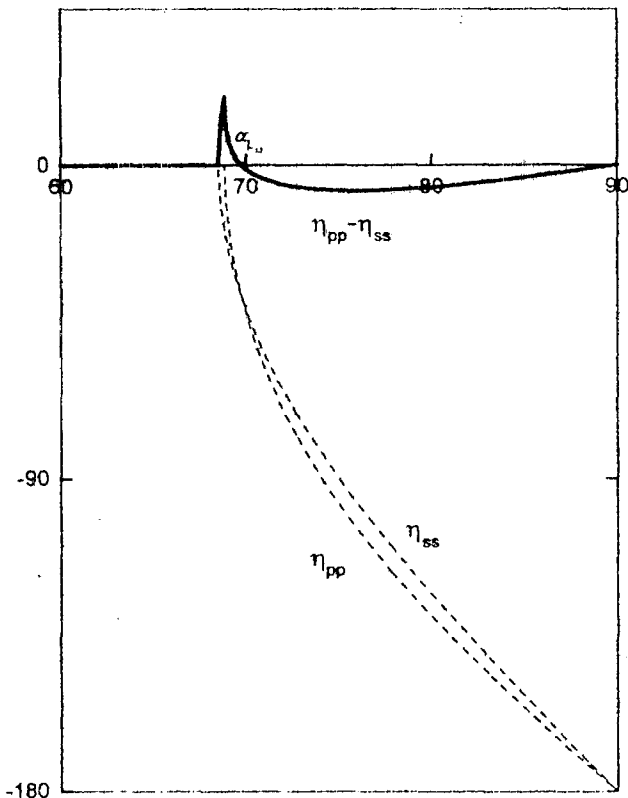


Figura 9: Fases y diferencias de fase para los modos p y s cuando el plano de incidencia es el  $z_1z_2$  ( $n=1.700$ ,  $n_1=1.588$ ,  $n_2=1.582$ ,  $n_3=1.552$ ,  $\vartheta_3=15^\circ$ )

#### IV. CONCLUSIONES

Hemos analizado la variación de las fases de las componentes de la luz reflejada en la zona de reflexión total cuando la interfaz está formada por un medio isotrópico y un cristal biaxial, y el plano de incidencia es un plano principal del cristal. El comportamiento de la variación de la fase en cristales biaxiales se comparó con el caso en que la interfaz esté formada por un medio isotrópico y otro uniaxial con el eje óptico en el plano de incidencia.

De los cálculos efectuados para los casos en que la interfaz esté formada por un medio isotrópico y otro anisótropo biaxial tal que los planos de incidencia coincidan con los planos principales del cristal, se obtiene que, a semejanza de lo que ocurre cuando ambos medios son isotrópicos o el segundo medio es un cristal uniaxial con el eje óptico contenido en el plano de incidencia, pueden existir dos ángulos de incidencia

para los cuales la luz reflejada está circularmente polarizada. Como en el caso en que el segundo medio sea uniaxial, en las interfaces estudiadas en este trabajo, uno de los ángulos de incidencia obtenidos es mayor que ambos ángulos de reflexión total y el otro está comprendido entre ellos. Para el primer ángulo es necesario que el rayo incidente esté polarizado a  $45^\circ$  respecto del plano de incidencia, mientras que para el segundo la polarización del rayo incidente tiene que compensar la polarización del rayo refractado que subsiste. Se ha encontrado además que se pueden encontrar un ángulo de incidencia en la zona de reflexión total para el cual la polarización de la luz reflejada es lineal. Esto es posible sólo para dos de los tres planos principales: en el caso en que a la onda cuya velocidad de fase es independiente de su dirección le corresponda el menor de los índices principales (análogo al caso de cristales uniaxiales positivos con el eje óptico en el plano de incidencia) y en un caso que no se puede asimilar a cristales uniaxiales (cuando la onda mencionada tiene velocidad de fase principal intermedia y el plano de incidencia coincide con el plano que contiene a los ejes ópticos).

#### Referencias

- 1 - J. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill, New York (1941)
- 2 - M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*. Pergamon Press (1980)
- 3 - R. M. A. Azzam and N. M. Bashara *Ellipsometry and Polarized Light*. North-Holland (1988)
- 4 - Simon M.C., Perez L.I. and Díaz I. *Optik*, **110**, 439-445 (1999)
- 5 - Perez L.I., Simon M.C., Díaz I. *Anales AFA* **11**, 103-107 (1999)
- 6 - Simon M.C. and Perez L.I. *Pure and Applied Optics A (JEOS)* (enviado para su publicación)
- 7 - Simon M.C. *Jour. Opt. Soc. Am. A* **4**, 2201-2204 (1987)
- 8 - Simon M.C. and Gottschalk, K.V. *Pure and Applied Optics* **4**, 27-38 (1995)
- 9 - Simon M.C. and Díaz I. *Optik* **102**, 1-8 (1996)

CEILAP  
CITEFA - CONICET  
ZUFRIATEGUI Y VARELA  
1603 VILLA MARTELLI  
REPUBLICA ARGENTINA