

**PROGRAMA NACIONAL DE ELECTRÓNICA  
CONGRESO CIENTIFICO  
RESÚMENES DE TRABAJOS OCTUBRE 9-10-11 Y 12 DE 1979  
LA FALDA -- CÓRDOBA REPÚBLICA ARGENTINA**

**MINISTERIO DE CULTURA Y EDUCACIÓN  
SECRETARIA DE ESTADO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**Temario**

**MESA 6 - ÁREA COMPONENTES Y MATERIALES SALA "B"  
15.30 Medición por Interferometría infrarroja de capas  
epitaxiales Líc. Berset - INTI**

# ESTUDIO Y PUESTA A PUNTO DE LA TÉCNICA DE MEDICIÓN DE ESPESORES DE CAPAS EPITAXIALES POR EL MÉTODO DE INTERFEROMETRIA INFRARROJA

Alberto Berset y Enrique Grünhut

Sector Materiales, Componentes y Sistemas Electrónicos, INTI.

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro de las determinaciones de gran interés en la industria de semiconductores está la medición del espesor de films monocristalinos crecidos sobre sustratos monocristalinos.

El espesor de dichos films, llamados epitaxiales, puede medirse por métodos destructivos y no destructivos. Dentro de éstos el más extensamente utilizado es el que se basa en la obtención e interpretación de un espectro de interferencia infrarrojo.

Este método, propuesto por primera vez por Spltzer, W.G. y Tanenbaum, M. (1) en 1961 y que aparece esquemáticamente mencionado en diferentes publicaciones dedicadas a la caracterización de semiconductores (2)(3)(4)(5)(6) ha sido extensamente estudiado y objeto de numerosos aportes para su mejoramiento y automatización(7)(8)(9)(10)(11)(12)(13).

En este trabajo se describe de un modo detallado y accesible para el no iniciado en el campo, la teoría y la técnica a emplear. En este resumen no se Incluyen las tablas de cambio de fase, que pueden ser solicitadas a los autores.

## 2.. PARTE EXPERIMENTAL

### 2..1. CONDICIONES DE TRABAJO

Para que este método pueda ser aplicado, la resistividad del sustrato debe ser menor que  $0,02 \Omega\text{cm}$  (alta concentración de Impurezas) a  $23^\circ\text{C}$  y la resistividad de la capa epttaxlal debe ser mayor que  $0,1 \Omega\text{cm}$  (baja concentración de impurezas) a  $23^\circ\text{C}$ .

La superficie de la oblea debe ser altamente reflectiva, libre de imperfecciones y de pasivadores, salvo los óxidos nativos.

Las obleas que se utilizaron tenían sustratos de conduc-tividad tipo " n " y capa epitaxial de conductividad tipo " n+ ".

### 2.2. SISTEMAS DE MEDICIÓN UTILIZADOS

Se utilizó un espectrómetro infrarrojo Perkin Elmer IR 577, con rango de longitudes de onda 2 a  $50 \mu\text{m}$  y un sistema óptico de reflectancia Barnes modelo 133.

Esta técnica se puede aplicar con buenos resultados para me-Dir espesores de capas de conductividad tipo " n " y " p ", de espeso-res mayores de  $2 \mu\text{m}$ . Reduciendo la precisión, puede ser también apli-cada a espesores de  $0,5$  a  $2 \mu\text{m}$ .

La distribución de impurezas debe ser uniforme, si no, es imposible aplicar el método y el ángulo de Incidencia del haz infra-rrrojo debe ser menor de  $30^\circ$  para evitar los efectos de polarización.

El ángulo de incidencia del equipo que nosotros utilizamos es de  $5^\circ 38'$ .

Se midió la resistividad del sustrato por el método de las cuatro puntas y el tipo de conductividad del sustrato y de la capa epitaxial por el método de punta caliente.

Se construyeron porta obleas de acrílico para evitar daños en la superficie de la oblea. Teniendo en cuenta que la máscara debe ser construida en un material que no refleje y la apertura debe ser tal que exponga un área da la superficie de la oblea pequeña, y que el valor del dilmetro de la apertura tiene que ser pequeño para elimi-nar fluctuaciones por efecto de espesor; se construyeron máscaras de grafito con un diámetro de apertura de  $4\text{mm}$ .

### 2.3. PREPARACION DE LOS EQUIPOS

Seguendo las recomendaciones ASTM F95-73 se calibraron las longitudes de onda a medirse con una exactitud < 0,05 μm; para ver cuál es la máxima velocidad de barrido permitida, se eligió una oblea con un sustrato de resistividad entre 0,008 y 0,012 Ωcm.

Se registra el espectro infrarrojo a utilizarse, que debe dar un mínimo observable a longitudes de onda mayores de 25 μm, para diferentes velocidades de barrido. La velocidad máxima admisible es aquella que muestra un cambio en la posición del mínimo menor que ± 0,1 μm relativo al mínimo registrado a la más baja velocidad de barrido. Las velocidades de barrido que utilizamos fueron: X10 - 120 mín y X5 - 60 mín.

Para determinar la longitud de onda de cada pico y valle en el espectro de reflexión; se tomaron los valores de longitudes de onda de la intersección de una línea horizontal, que se traza a un 3% de la escala máxima debajo de un máximo o arriba de un mínimo y se promediaron estos valores.

$$d_n = \left( P_n - 1/2 + \frac{\delta_{2n}}{2\pi} \right) \times \left( \frac{\lambda_n}{2(n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \right) \quad (2)$$

### 3. CÁLCULOS

Para la determinación de los órdenes correspondientes a cada máximo y mínimo se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_n = \frac{m \lambda_1}{(\lambda_1 - \lambda_n)} + 1/2 - \frac{(\delta_{21} \lambda_1 - \delta_{2n} \lambda_n)}{2\pi(\lambda_1 - \lambda_n)} \quad (1)$$

donde se estipula que λ<sub>1</sub> > λ<sub>n</sub> y el significado de los simbolos es el siguiente :

P<sub>n</sub> : orden correspondiente a la longitud de onda "n".

m : diferencia de órdenes de los extremos considerados (m = P<sub>1</sub> - P<sub>2</sub>).

λ : longitud de onda en μm.

δ<sub>21</sub> y δ<sub>2n</sub> : son los cambios de fase sufridos por el haz reflejado en la interfase capa - sustrato para λ<sub>1</sub> y λ<sub>n</sub> respectivamente.

Los valores de los cambios de fase (21) (22) (23) en la interfase capa - sustrato se encuentran tabulados en las tablas del apéndice del trabajo.

El espesor se calcula con la siguiente ecuación (tablas N°1 a N°4):

$$d_n = \left( P_n - 1/2 + \frac{\delta_{2n}}{2\pi} \right) \times \left( \frac{\lambda_n}{2(n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \right) \quad (2)$$

donde:

d<sub>n</sub> : espesor de la capa epitaxial.

n<sub>1</sub> : índice de refracción de la capa epitaxial.

n<sub>0</sub> : índice de refracción del aire.

θ : ángulo de incidencia del haz infrarrojo sobre la capa epitaxial.

El espesor  $dn$  tendrá unidades de  $\mu\text{m}$  si usamos longitudes de onda y de  $\text{cm}$  si usamos número de onda. Se calcula  $dn$  para todos los máximos y mínimos, y luego se halla el promedio ). La parte teórica de las ecuaciones, que se halla desarrollada en el apéndice del trabajo, fue elaborada en base a trabajos previos (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (24).

#### 4. ELIMINACIÓN DE RUIDO

A longitudes de onda entre  $28 \mu\text{m}$  ( $350 \text{ cm}^{-1}$ ) y  $50 \mu\text{m}$  ( $200 \text{ cm}^{-1}$ ), el dióxido de carbono y el agua presentes en el aire dan bandas en el espectro infrarrojo.

En consecuencia es obvio que para evitar las indefiniciones que aparecen corrientemente en los picos o valles del espectro de interferencia infrarroja, es conveniente trabajar en atmósferas inertes en ese rango del infrarrojo.

Nosotros registramos espectros en aire y en nitrógeno para su comparación.

La figura N°1 muestra al espectro obtenido en atmósfera de aire y la figura N°2 el obtenido en atmósfera de nitrógeno. En la parte superior de estas figuras, donde están marcados los números de onda y el ruido, se observa claramente como en atmósfera de nitrógeno se eliminan casi totalmente las bandas entre  $350 \text{ cm}^{-1}$  y  $200 \text{ cm}^{-1}$ .

Además, comparando los dos espectros de interferencia, vemos que en atmósfera de aire los máximos y mínimos de amplitud numerados  $n = 4$ ;  $n = 3$ ;  $n = 2$ ; y  $n = 1$ ; no están tan bien definidos como los registrados en atmósfera de nitrógeno.

En base a lo observado es aconsejable trabajar en atmósfera de nitrógeno cuando las características del trabajo exijan mejorar la precisión.

#### 5. TRATAMIENTO DE ERROR

Los parámetros que aportan mayor error son: el índice de refracción de la capa epitaxial y la longitud de onda.

Considerando los tres métodos; ASTM F95 - 73, dispersión standard y propagación, nosotros hemos tomado como error el ASTM, él nos indica el máximo error probable.

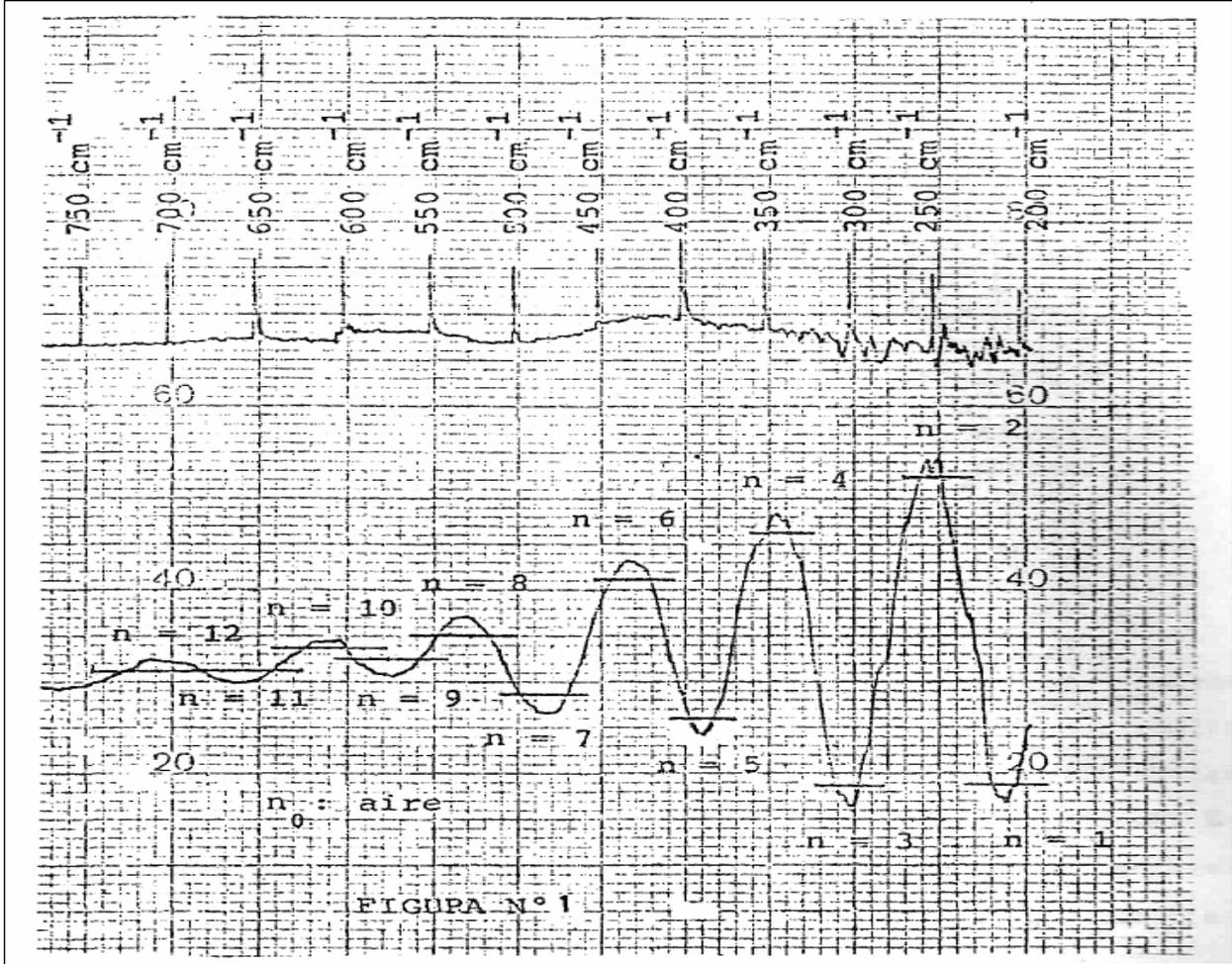


Figura N°1. Espectro de reflectancia infrarroja en atmósfera de aire.

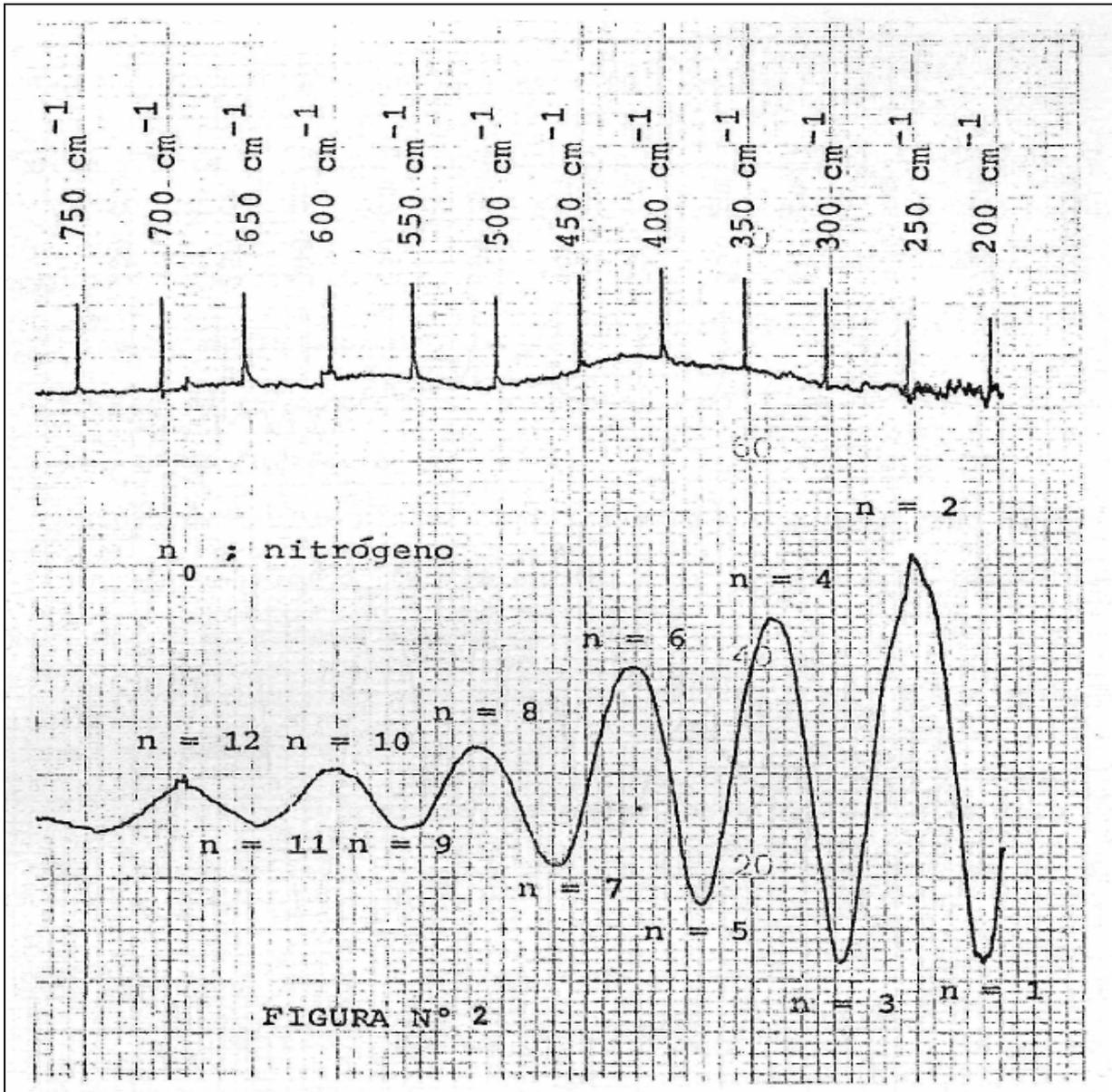


Figura N°2. Espectro de reflectártela infrarroja en atmósfera de nitrógeno

# **Estudio y puesta a punto de la técnica de medición de espesores de capas epitaxiales por el método de interferometría infrarroja**

Lic. Berset, Alberto y Dr. Grünhut, Enrique  
**Sector Materiales, Componentes y Sistemas Electrónicos**  
**INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial)**

**Mayo 1979**

*Presentado en el Congreso Científico del Programa Nacional de Electrónica de la Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología realizado del 09 al 12 de octubre de 1979 en La Falda - Provincia de Córdoba - República Argentina.*

## 0 Contenido

1	INTRODUCCIÓN .....	8
2	PARTE EXPERIMENTAL .....	8
2.1	Condiciones de trabajo .....	8
2.2	SISTEMAS DE MEDICIÓN UTILIZADOS .....	9
2.3	PREPARACIÓN DE LOS EQUIPOS .....	10
3	CÁLCULOS .....	11
4	EJEMPLO DE CÁLCULO .....	13
5	TRATAMIENTO DE ERROR .....	18
6	ELIMINACIÓN DEL RUIDO .....	21
7	APÉNDICE .....	25
7.1	TEORÍA .....	25
7.2	SIGNIFICADO DE LOS SÍMBOLOS .....	32
7.3	Tablas .....	34
8	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	63

# 1 INTRODUCCIÓN

Dentro de las determinaciones de gran interés en la industria de semiconductores está la medición del espesor de films monocristalinos crecidos sobre substratos monocristalinos.

El espesor de dichos films, llamados epitaxiales, puede medirse por métodos destructivos y no destructivos. Dentro de éstos el más extensamente utilizado es el que se basa en la obtención e interpretación de un espectro de interferencia infrarrojo.

Dichas interferencias aparecen debido a que la capa epitaxial es transparente y el substrato absorbente a la radiación utilizada.

El haz infrarrojo al ser reflejado en la interfase capa-substrato y en la interfase aire-capas, tiene dos caminos ópticos distintos, apareciendo a ciertos valores de longitud de onda interferencia destructiva (mínimo) y a otros valores interferencia constructiva (máximo).

Este método, que fue propuesto por primera vez por Spitzer, W.G. y Tanenbaum, M. en 1961 y que aparece esquemáticamente mencionado en diferentes publicaciones dedicadas a la caracterización de semiconductores <sup>(2) (3) (4) (5) (6)</sup>, ha sido extensamente estudiado y objeto de numerosos aportes para su mejoramiento y automatización <sup>(7) (8) (9) (10) (11) (12) (13)</sup>.

En este trabajo se describe de un modo detallado y accesible para el no iniciado en el campo, la teoría y la técnica a emplear. Se incluyen también tablas, cuyo uso es necesario para el empleo de esta técnica, que aparecieron originalmente en publicaciones de difícil acceso.

## 2 PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1 Condiciones de trabajo

Para que este método pueda ser aplicado, una observable diferencia tiene que existir entre las constantes ópticas de la capa epitaxial y el substrato; para poder efectuar mediciones, la resistividad del substrato debe ser menor que  $0.02 \Omega \cdot \text{cm}$  (alta concentración de impurezas) a  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura y la resistividad de la capa epitaxial debe ser mayor que  $0.1 \Omega \cdot \text{cm}$  (baja concentración de impurezas) a  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura.

La superficie de la oblea debe ser altamente reflectiva, libre de imperfecciones y de pasivadores, salvo los óxidos nativos.

Las obleas que se utilizaron tenían substratos de conductividad tipo " n " y capa epitaxial de conductividad tipo " n<sup>+</sup> ".

Es una característica esencial para todos los cálculos que se hacen, asumir que la "juntura" es abrupta, lo cual no es estrictamente así en todos los casos. Sin embargo la teoría sigue siendo válida aun en el caso de juntura difusa<sup>(15)</sup>, pues Sato, K.; Ishikawa, Y. y Sugawara, K.<sup>(8)</sup> con tratamiento térmico encontraron que si bien, para un mismo espesor de capa epitaxial, las franjas de interferencia cambian hacia valores más bajos de longitud de onda, y decrece su amplitud a medida que se difunde la juntura, el valor final obtenido para el espesor permanece constante.

Lo que ocurre es que:

- 1) Aunque la amplitud del espectro de interferencia decrece con el tratamiento térmico, el nivel de base no varía.
- 2) Si bien los máximos y los mínimos de las franjas cambian hacia menores longitudes de onda conjuntamente; la diferencia de longitud de onda entre máximos y mínimos adyacentes no cambia con el tratamiento térmico.

## 2.2 SISTEMAS DE MEDICIÓN UTILIZADOS

Se utilizó un espectrómetro infrarrojo Perkin Elmer IR 577, con rango de longitudes de onda 2 a 50  $\mu\text{m}$  y un sistema óptico de reflectancia Barnes modelo 133.

El rango de longitudes de onda en el cual se trabajó es de 2.5 a 50  $\mu\text{m}$  y se toma como independiente de la longitud de onda al índice de refracción de la capa epitaxial (el error que se comete es menor a 0.5%<sup>(14)</sup>).

Esta técnica se puede aplicar con buenos resultados para medir espesores de capas de conductividad tipo "n" y "p", de espesores mayores de 2  $\mu\text{m}$ . Reduciendo la precisión, puede ser también aplicada a espesores de 0.5 a 2  $\mu\text{m}$ .

La distribución de impurezas debe ser uniforme, si no, es imposible aplicar el método.

El ángulo de incidencia del haz infrarrojo debe ser menor de 30° para evitar los efectos de polarización."Estos se pueden despreciar en estas mediciones (se despreciaron también en el desarrollo de la teoría en el apéndice), porque para un ángulo de incidencia de 30° el error en reflectancia entre  $r_{01}^2$  y la expresión que incluye la polarización es menor del 1% a  $\lambda = 50 \mu\text{m}$ . Debido al alto índice de refracción ( $n_1 = 3.42$ ) de la capa epitaxial el haz incidirá en la interfase capa-substrato con un ángulo máximo de 8°, para un ángulo de incidencia de 30° en la interfase aire - capa. El error en  $r_{12}^2$  es entonces mucho menor que el 1% y ambos errores disminuyen aun más para longitudes de onda menores a 50  $\mu\text{m}$ .

El ángulo de incidencia del equipo que nosotros utilizamos es de 5°38'.

Se midió la resistividad del substrato por el método de las cuatro puntas y el tipo de conductividad del substrato y de la capa epitaxial por el método de punta caliente.

Se construyeron porta obleas de acrílico para evitar daños en la superficie de la oblea. Teniendo en cuenta que la máscara debe ser construida en un material que no refleje y la apertura debe ser tal que exponga un área de la superficie de la oblea pequeña, y que el valor del diámetro de la apertura tiene que ser pequeño para eliminar fluctuaciones por efecto de espesor; se construyeron máscaras de grafito con un diámetro de apertura de 4 mm.

## 2.3 PREPARACIÓN DE LOS EQUIPOS

Siguiendo las recomendaciones ASTM F95 - 73 se calibraron las longitudes de onda a medirse con una exactitud  $\pm 0.05 \mu\text{m}$ ; para ver cuál es la máxima velocidad de barrido permitida, se eligió una oblea con un substrato de resistividad entre 0.008 y 0.012  $\Omega\text{cm}$ .

Se registra el espectro infrarrojo a utilizarse, que debe dar un mínimo observable a longitudes de onda mayores de 25  $\mu\text{m}$ , para diferentes velocidades de barrido. La velocidad de barrido máxima admisible es aquella que muestra un cambio en la posición del mínimo menor que  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  relativo al mínimo registrado a la más baja velocidad de barrido.

Las velocidades de barrido que utilizamos fueron: X10 – 120 min y X5 - 60 min.

Para determinar la longitud de onda de cada pico y valle en el espectro de reflexión; se tomaron los valores de longitudes de onda de la intersección de una línea horizontal, que se traza a un 3% de la escala máxima debajo de un máximo o arriba de un mínimo y se promediaron estos valores.

Se debe tener en cuenta que no se puede calcular el espesor de la capa epitaxial si la relación del pico o valle a la amplitud del ruido es menor que cinco.

### 3 CÁLCULOS

Para la determinación de los órdenes correspondientes a cada máximo y mínimo se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_n = \frac{m \lambda_1}{(\lambda_1 - \lambda_n)} + 1/2 - \frac{(\delta_{21} \lambda_1 - \delta_{2n} \lambda_n)}{2 \pi (\lambda_1 - \lambda_n)} \quad (1)$$

donde se estipula que  $\lambda_1 > \lambda_n$  y el significado es el siguiente:

$P_n$ : orden correspondiente a la longitud de onda "n".

m: diferencia de ordenes de los extremos considerados

( $m = P_1 - P_n$ )

$\lambda$  : longitud de onda en  $\mu\text{m}$ .

$\delta_{21}$  y  $\delta_{2n}$  : son los cambios de fase sufridos por el haz reflejado en la interfase capa-substrato para  $\lambda_1$  y  $\lambda_n$  respectivamente.

Los valores de los cambios de fase <sup>(21)(22)(23)</sup> en la interfase capa-substrato se encuentran tabulados en las tablas del apéndice (tablas N°1 al N°4).

El espesor se calcula con la siguiente ecuación:

$$d_n = \left( P_n - 1/2 + \frac{\delta_{2n}}{2 \pi} \right) \times \left( \frac{\lambda_n}{2 (n_1^2 - n_0^2 \text{sen}^2 \theta)^{1/2}} \right) \quad (2)$$

donde:

$d_n$ : espesor de la capa epitaxial.

$n_1$ : índice de refracción de la capa epitaxial.

$n_0$ : índice de refracción del aire.

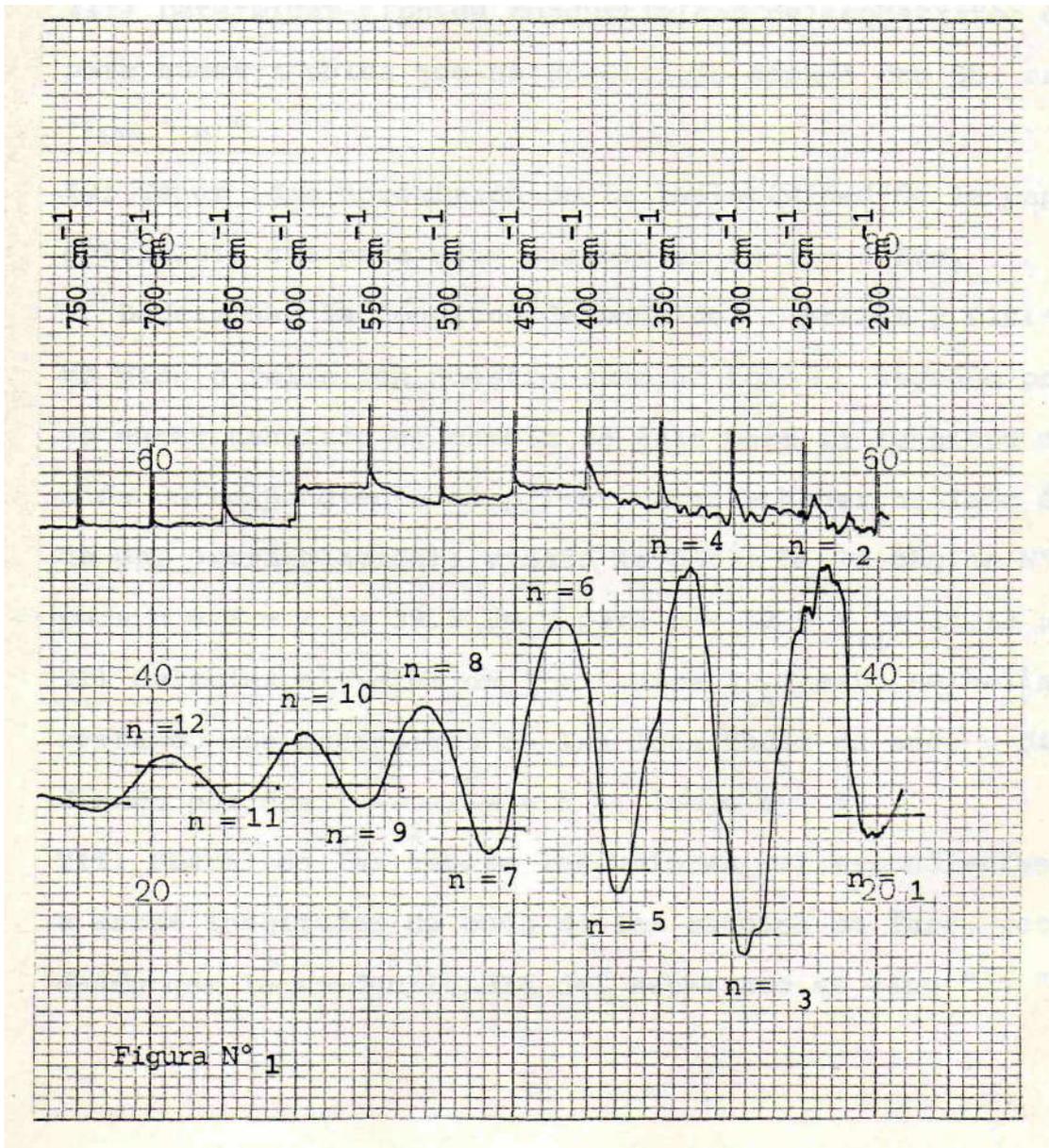
$\theta$ : ángulo de incidencia del haz infrarrojo sobre la capa epitaxial.

El espesor  $d_n$  tendrá unidades de  $\mu\text{m}$  si usamos longitudes de onda y de cm si usamos número de onda.

Se calcula  $d$  para todos los máximos y mínimos y luego se halla el promedio ( $\bar{d}$ ).

La parte teórica de las ecuaciones, que se halla desarrollada en el apéndice, fue elaborada en base a trabajos previos<sup>(16) (17) (18) (19) (20) (24)</sup>.

## 4 EJEMPLO DE CÁLCULO



Los pasos a seguir para determinar el espesor de una oblea son los siguientes:

- I) Obtener el valor de la resistividad del substrato en el lugar donde se piensa medir el espesor de la capa epitaxial (en la parte de atrás de la oblea). En nuestro ejemplo vale  $0,010 \Omega\text{cm}$ .
- II) Determinar tipo de conductividad de la capa epitaxial; que en nuestro caso es de tipo " $n^+$ " (Silicio).

- III) Determinar tipo de conductividad del sustrato; que para nuestra oblea que es de Silicio dopado con Sb, es tipo "n".
- IV) Tener idea aproximada de la resistividad de la capa epitaxial; que para este ejemplo es de 1 - 3 Ωcm.
- V) Determinar la longitud de onda del primer y último pico o valle (en nuestro caso se tomo el segundo por no estar tabulado el cambio de fase para la longitud de onda correspondiente al primer valor y haber hallado éste por extrapolación); viendo la tabla de la página N° 13, para  $n = 2 \rightarrow \lambda_2 = 39,30 \mu\text{m}$  y para  $n = 12 \rightarrow \lambda_{12} = 14,12 \mu\text{m}$ .
- VI) Calcular el valor de " m " para  $\lambda_{12}$ ; esto se halla restando los subíndices de las longitudes de onda y dividiendo por dos  $((\frac{12-2}{2}) = 5)$ , luego  $m = 5$ .
- VII) Buscar en las tablas los valores correspondientes a estas longitudes de onda de los cambios de fase, recordando que la conductividad del sustrato es tipo "n", el material semiconductor Silicio y la resistividad es de 0,010 Ωcm.

$$\frac{\delta_{22}}{2\pi} = 0.227$$

$$\frac{\delta_{212}}{2\pi} = 0.088$$

- VIII) Calcular el orden asociado a  $\lambda_{12}$  de la ecuación (1):

$$P_{12} = \frac{m \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_{12})} + 1/2 - \frac{\delta_{22} \lambda_2 - \delta_{212} \lambda_{12}}{2\pi (\lambda_2 - \lambda_{12})}$$

entonces

$$P_{12} = \frac{5 \times 39.3 \mu\text{m}}{(39.3 - 14.12) \mu\text{m}} + 0.5 - \frac{0.227 \times 39.3 \mu\text{m} - 0.088 \times 14.12 \mu\text{m}}{(39.3 - 14.12) \mu\text{m}}$$

$$P_{12} = 7.80 + 0.50 - 0.31 = 7.99 \approx 8.00$$

Se aproxima al entero o semi-entero más próximo porque el orden es semi-entero para un mínimo y entero para un máximo.

$$P_{12} = 8,00$$

IX) Sustituir el valor de  $P_{12}$  en la ecuación (2)

$$d_{12} = \left( P_{12} - 1/2 + \frac{\delta_{212}}{2\pi} \right) \times \left( \frac{\lambda_{12}}{2(n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \right)$$

$$d_{12} = (8,0 - 0,5 + 0,088) \times (14,12 \mu\text{m} \times 0,1462)$$

---

Nota : Se tomó el valor del índice de refracción del aire

$n_0 = 1$  (error cometido < 0,03%) y el del Silicio

$n_1 = 3,42$  como constante en el rango de longitudes de onda de trabajo <sup>(14)</sup>

(error cometido < 0,5%). El ángulo de incidencia en nuestro caso es de  $\theta = 5^\circ 38'$ .

$$\frac{1}{2 (n_1^2 - n_0^2 \text{sen}^2 \theta)^{1/2}} = 0.1462$$

Luego:

---

luego

$$d_{12} = 15,66 \mu\text{m}.$$

X) Repetir los puntos VIII y IX para todos los valores de " n " de la tabla de la página N° 13.

XI) Con todos los valores obtenidos de  $d_n$  se halla el promedio de estos ( $\bar{d}$ ):

$$\bar{d} = \sum_{n=1}^{12} \frac{d_n}{12}$$

que en nuestro ejemplo nos da igual a:

$$\bar{d} = 15,64 \mu\text{m} \quad \sigma = 0,04$$

Instituto Nacional de Tecnología Industrial

**SECTOR: MATERIALES, COMPONENTES Y SISTEMAS ELECTRÓNICOS**

INFORME N°

Datos de la oblea: N/N<sup>+</sup> - (111) - Dopante Sb - Si -

Resistividad Substrato 0,010Ωcm

Técnica Utilizada:

Operador:

Fecha:

n	$\lambda_n = \mu\text{m}$ $\lambda_n$	$\delta 2n/2\pi$	$P_n$	$d_n = \mu\text{m}$ $d_n$	Observaciones
1	46,9 ± 0,2	0,275	m= ( ) ≅ 2,5	15,60	Cambio de fase extrapolado .
2	39,3 ± 0,1	0,227	m= 0 ( ) ≅ 3,0	15,67	-----
3	33,53 ± 0,06	0,194	m= 0,5 (3,49) ≅ 3,5	15,66	-----
4	29,11 ± 0,04	0,168	m= 1,0 (3,96) ≅ 4,0	15,61	-----
5	25,73 ± 0,03	0,148	m= 1,5 (4,47) ≅ 4,5	15,60	-----
6	23,1 ± 0,1	0,133	m= 2,0 (4,99) ≅ 5,0	15,65	-----
7	20,86 ± 0,03	0,121	m= 2,5 (5,48) ≅ 5,5	15,62	-----
8	19,12 ± 0,04	0,113	m= 3,0 (4,47) ≅ 4,5	15,69	-----
9	17,48 ± 0,03	0,104	m= 3,5 (6,48) ≅ 6,5	15,60	-----
10	16,26 ± 0,04	0,098	m= 4,0 (7,00) ≅ 7,0	15,68	-----
11	15,13 ± 0,07	0,093	m= 4,5 (7,51) ≅ 7,5	15,69	-----
12	14,12 ± 0,04	0,088	m= 5,0 (7,99) ≅ 8,0	15,66	-----

NOTA: En algunos casos cuando el valor de  $\sigma$  es mayor de 0,1, se puede mejorar el valor promedio y a su vez  $\sigma$ , eliminando algunos de los datos obtenidos de mayor longitud de onda y haciendo un nuevo promedio.

## 5 TRATAMIENTO DE ERROR

El error calculado por propagación partiendo de la ecuación (2) es:

$$\begin{aligned} \Delta d_n = & \frac{\partial^3 d_n}{\partial n_1 \partial \lambda_n \partial \delta_{2n}} = \left( \frac{\Delta \delta_{2n}}{2\pi} \right) \left( \frac{\lambda_n}{2(n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \right) + \\ & + \left( P_n - 1/2 + \frac{\delta_{2n}}{2\pi} \right) \left( \frac{\Delta \lambda_n}{2(n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \right) + \\ & + \left( P_n - 1/2 + \frac{\delta_{2n}}{2\pi} \right) \left( \frac{\lambda_n n_1 \Delta n_1}{2(n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{3/2}} \right) \end{aligned}$$

$$\Delta d_1 = 0,007 + 0,067 + 0,046 = 0,12 \mu\text{m}$$

$$\Delta d_2 = 0,002 + 0,044 + 0,046 = 0,092 \mu\text{m}$$

luego el error por propagación es:

$$\Delta d_n = \pm 0,1 \mu\text{m}$$

Los parámetros que aportan mayor error son: el índice de refracción y la longitud de onda.

El método ASTM F95 - 73 estima para capas de conductividad de tipo "n" de espesor más grande que 2  $\mu\text{m}$  un error de  $\pm (0,25 \mu\text{m} + 0,005 \bar{d})$ , que aplicado a nuestro ejemplo da:

$$\Delta \bar{d} = \pm 0,3 \mu\text{m}$$

El mismo método ASTM estima para capas de conductividad tipo "p" ó "n", con espesores entre 0,5 y 2  $\mu\text{m}$ , un error de  $\pm (0,51 \mu\text{m} + 0,035 \bar{d})$  y para capas de tipo "p" de espesor más grande de 2  $\mu\text{m}$  un error de  $\pm (0,25 \mu\text{m} + 0,025 \bar{d})$ , donde  $\bar{d}$  en todo los casos es el espesor promedio.

Vimos en el ejemplo de cálculo que la dispersión estándar es  $\sigma = 0,04$ .

Considerando los tres métodos; ASTM, dispersión estándar y propagación, nosotros hemos elegido en este ejemplo el error ASTM, el nos indica el máximo error probable, es decir:

$$d = (15,6 \pm 0,3) \mu\text{m}$$

En la página siguiente, se muestra un ejemplo de cómo se puede presentar un informe.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial

SECTOR: MATERIALES, COMPONENTES Y SISTEMAS ELECTRÓNICOS

INFORME N°

Datos de la oblea:

Silicio dopado con Sb. (111)

Substrato

Conductividad tipo n

Resistividad 0,010  $\Omega\text{cm}$

Capa crecida

Conductividad tipo  $n^+$

Resistividad 1-3  $\Omega\text{cm}$

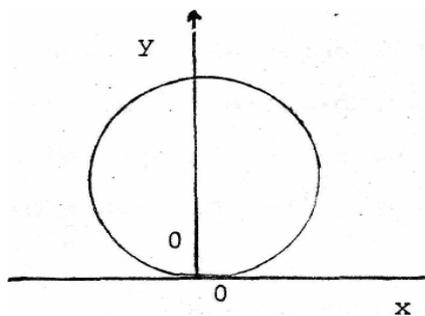
Rango barrido de longitudes de onda 4000 - 200  $\text{cm}^{-1}$  Mascara utilizada 4 mm

Velocidad de barrido X10 - 120 min

Lugar de medición en la oblea:

x= 0 mm

y= 16 mm



Espesor de la capa crecida  $15,6 \pm 0,3$   $\mu\text{m}$

Fecha del informe: \_\_\_\_\_

Observaciones:

\_\_\_\_\_  
Firma

Aclaración:

## 6 ELIMINACIÓN DEL RUIDO

A longitudes de onda entre  $28 \mu\text{m}$  ( $350 \text{ cm}^{-1}$ ) y  $50 \mu\text{m}$  ( $200 \text{ cm}^{-1}$ ), el dióxido de carbono y el agua presentes en el aire dan bandas en el espectro infrarrojo.

En consecuencia, es obvio que para evitar las indefiniciones que aparecen corrientemente en los picos o valles del espectro de interferencia infrarroja, es conveniente trabajar en atmosferas inertes en ese rango infrarrojo.

Nosotros registramos espectros en aire y en nitrógeno para su comparación.

La figura N°2 muestra el espectro obtenido en atmósfera de aire y la figura N°3 el obtenido en atmósfera de nitrógeno. En la parte superior de estas figuras, donde están marcados los números de onda y el ruido, se observa claramente como en atmósfera de nitrógeno se eliminan casi totalmente las bandas entre  $350 \text{ cm}^{-1}$  y  $200 \text{ cm}^{-1}$ .

Además, comparando los dos espectros de interferencia, vemos que en atmósfera de aire los máximos y mínimos de amplitud numerados  $n = 4$ ;  $n = 3$ ;  $n = 2$ ;  $n = 1$ ; no están tan bien definidos como los registrados en atmósfera de nitrógeno.

En base a lo observado es aconsejable trabajar en atmósfera de nitrógeno cuando las características del trabajo exijan mejorar la precisión.

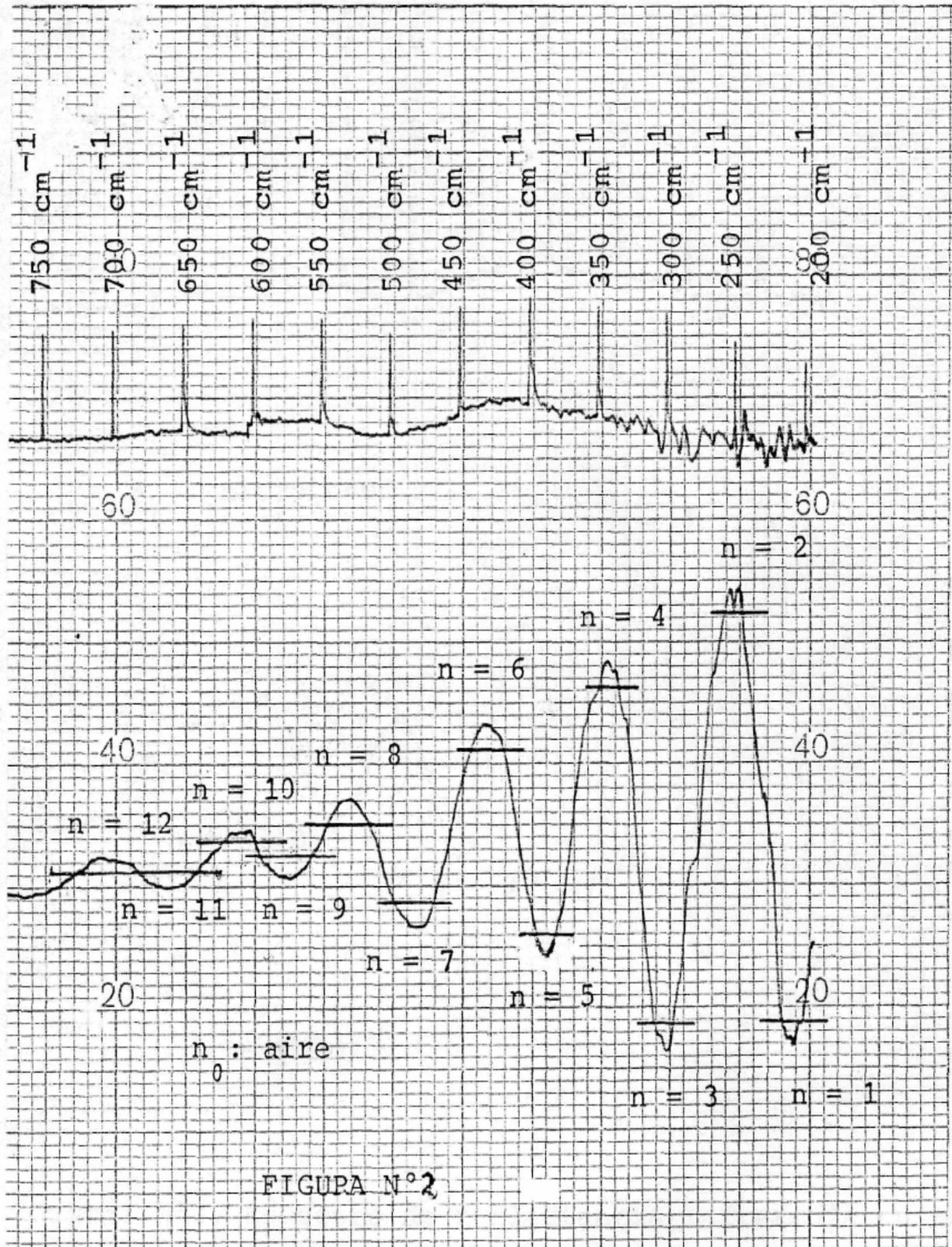


Figura N°2. Espectro de reflectancia infrarroja en atmósfera de aire.

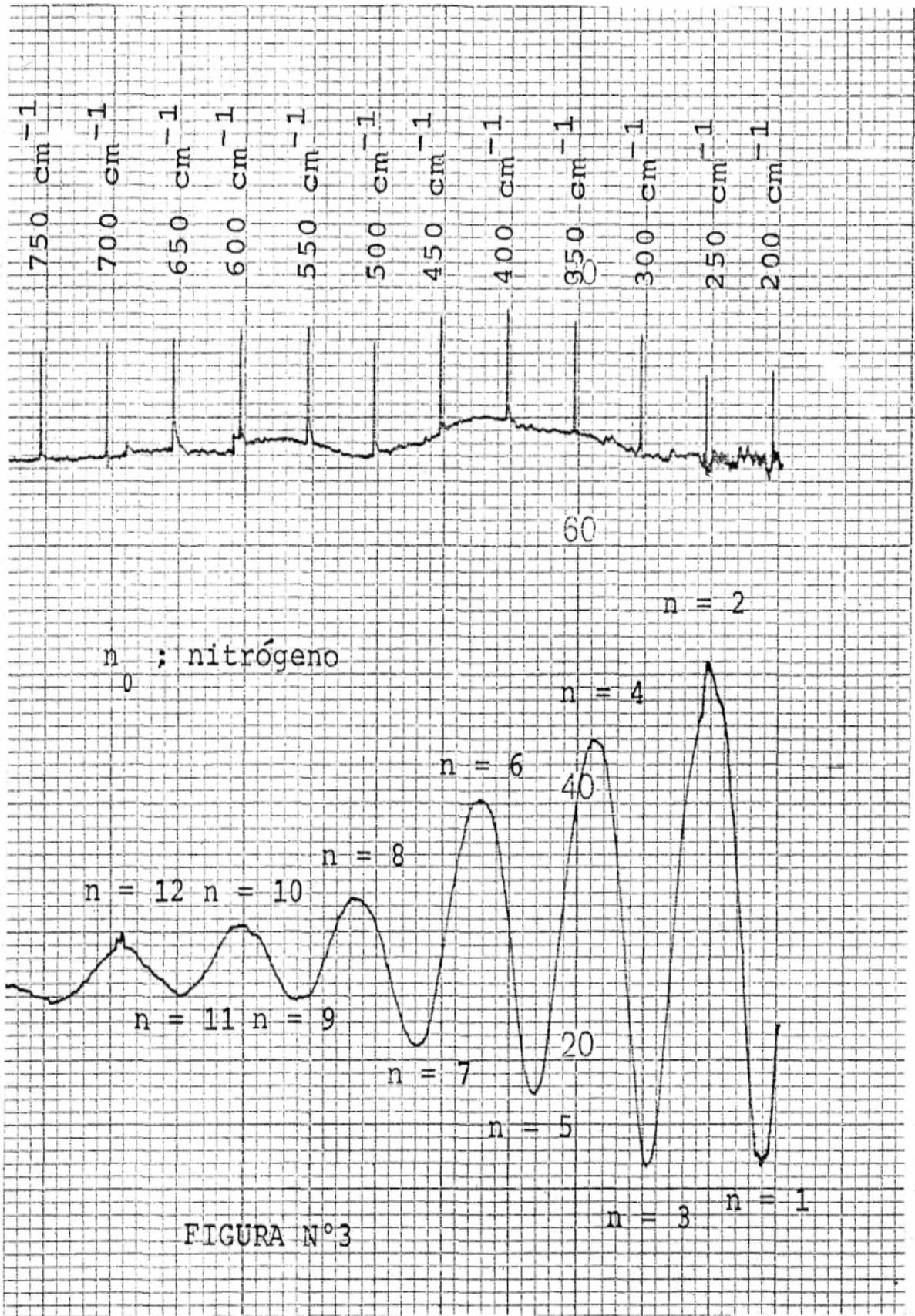


Figura N°3. Espectro de reflectancia infrarroja e n atmosfera de nitrógeno.

## 7 APÉNDICE

### 7.1 TEORÍA

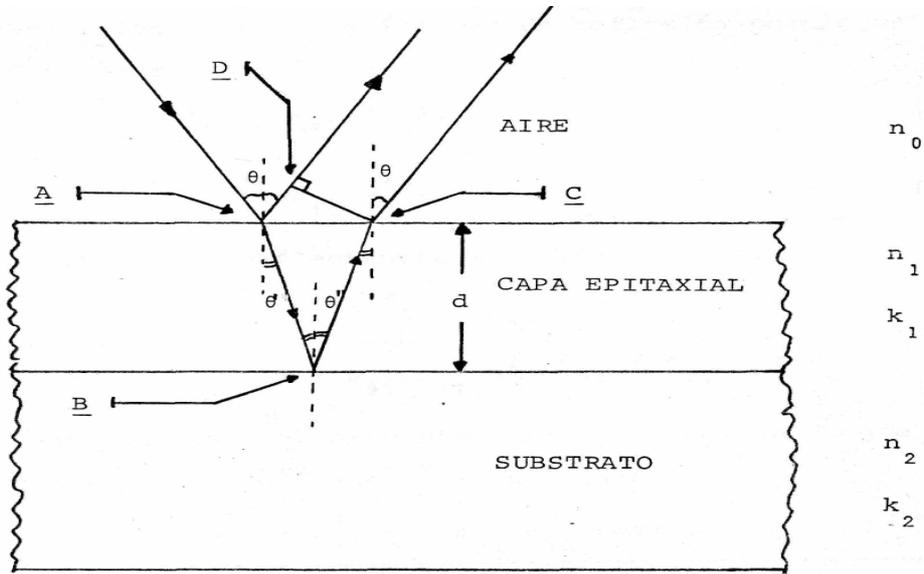


FIGURA N° 4.

Los coeficientes de reflexión son:

$$r_{01} = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad (1)$$

y

$$r_{12} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (2)$$

y el coeficiente de amplitud efectivo de reflexión " r " es:

$$r = \frac{r_{01} + r_{12} e^{-i\phi}}{1 + r_{01} r_{12} e^{-i\phi}} \quad (3)$$

donde

$$\phi = \frac{4 \pi d n_1}{\lambda \cos \theta'} \quad (4)$$

escribiendo para los índices de reflexión complejos "  $r = \rho e^{i\delta}$  " nos queda:

$$r_{01} = \rho_{01} e^{i\delta_{01}} \quad (5)$$

$$r_{12} = \rho_{12} e^{i\delta_{12}} \quad (6)$$

La reflectancia  $R = rr^*$ ; donde "r" es:

$$r = \frac{\rho_{01} e^{i\delta_{01}} + \rho_{12} e^{i(\delta_{12} - \phi)}}{1 + \rho_{01} \rho_{12} e^{i(\delta_{01} + \delta_{12} - \phi)}} \quad (7)$$

luego haciendo el producto "  $rr^*$  " y recordando que  $\cos x = \frac{1}{2} (e^{ix} + e^{-ix})$ , nos queda:

$$R = \frac{\rho_{01}^2 + \rho_{12}^2 + 2 \rho_{01} \rho_{12} \cos(\phi - \delta_{01} - \delta_{12})}{1 + \rho_{01}^2 \rho_{12}^2 + 2 \rho_{01} \rho_{12} \cos(\phi - \delta_{01} - \delta_{12})} \quad (8)$$

De la teoría electromagnética se puede demostrar que cuando la capa epitaxial (1) es transparente y el substrato (2) muestra absorción; el coeficiente de reflexión ( $\rho_{12}$ ) y el cambio de fase ( $\delta_{12}$ ) por reflexión esta dado por:

$$n_2 = n'_2 + ik_2 \quad (9)$$

$$r_{12} r_{12}^* = \rho_{12}^2 = \frac{(n_1 - n'_2)^2 + k_2^2}{(n_1 + n'_2)^2 + k_2^2} \quad (10)$$

y

$$\text{tg } \delta_{12} = \frac{2 n_1 k_2}{n_1^2 - (k_2^2 + n_2'^2)} \quad (11)$$

Para una capa epitaxial de Silicio, con resistividad típica de  $1 \Omega \text{ cm}$ , sobre un sustrato de Silicio, el índice de refracción es  $n_1 = 3,42$ , con una parte imaginaria despreciable<sup>(14)</sup>.

Entonces, el valor del cambio de fase de  $\delta_{01}$  es encontrado y es  $\pi$  (recordar que

$$r_{01} = \rho_{01} (\cos \delta_{01} + i \operatorname{sen} \delta_{01}).$$

Ahora denominaremos directamente  $\delta$  a  $\delta_{12}$  y recordando lo dicho anteriormente nos da para "R" partiendo de (8) la siguiente ecuación:

$$R = 1 - \frac{(1 - \rho_{01})^2 (1 - \rho_{12})^2}{(1 - \rho_{01} \rho_{12})^2 + 4 \rho_{01} \rho_{12} \operatorname{sen}^2 \frac{1}{2} (\phi - \delta)} \quad (12)$$

Esta expresión puede ser aproximada si  $\rho_{12}^2 \ll 1$  y

$\rho_{01} \rho_{12} \ll 1$ , lo que resulta es:

$$R = \rho_{01} + 2 \rho_{01} \rho_{12} (1 - \cos(\phi - \delta)) \quad (13)$$

en la ecuación anterior se supone que el coeficiente de reflexión  $\rho_{12}$  no depende de la longitud de onda y que el cambio de fase ( $\delta$ ) sí depende de la longitud de onda.

Luego los valores extremos de la ecuación (13) son:

$$\phi - \delta = \ell 2 \pi \quad (\text{para un mínimo}) \quad (14)$$

$$\phi - \delta = (\ell + 1/2) 2 \pi \quad (\text{para un máximo}) \quad (15)$$

donde " $\ell$ " es un entero que indica el orden.

Ahora planteamos el problema para nuestra situación.

Las ecuaciones de las fases de los rayos que salen del punto "C" y "D" en términos de camino óptico y de los cambios de fase que los rayos sufren cuando se reflejan, es nuestro punto de partida.

Como la capa epitaxial es no absorbente, el cambio de fase del rayo transmitido en el punto "A" es "0".

$$\delta_C = \frac{4 \pi d n_1^2}{\lambda (n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} - \delta_{12} \quad (16)$$

$$\delta_D = \frac{4 \pi d n_0^2 \sin^2 \theta}{\lambda (n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} - \delta_{01} \quad (17)$$

entonces la diferencia de fases " $\Delta\delta$ " es:

$$\Delta\delta = \delta_{01} - \delta_{12} + \frac{4 \pi d}{\lambda} (n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \quad (18)$$

$$P = \frac{\Delta\delta}{2 \pi} \quad (19)$$

El orden "P" es definido de la siguiente manera:

entonces reemplazando (18) en (19):

$$P = \frac{\delta_{01}}{2 \pi} - \frac{\delta_{12}}{2 \pi} + \frac{2 d}{\lambda} (n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \quad (20)$$

Ahora cambiamos las denominaciones de la siguiente forma, a  $\delta_{01}$  por  $\delta_{1n}$  y a  $\delta_{12}$  por  $\delta_{2n}$ ; entonces la formula general nos queda:

$$P_n = \frac{\delta_{1n}}{2\pi} - \frac{\delta_{2n}}{2\pi} + \frac{2d}{\lambda_n} (n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \quad (21)$$

Si dos extremos en amplitud de interferencia se observan, los correspondientes órdenes son "P<sub>1</sub>" y "P<sub>2</sub>"; hallados resolviendo la ecuación (21).

$$P_1 = \frac{\delta_{11}}{2\pi} - \frac{\delta_{21}}{2\pi} + \left( \frac{2d (n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}{\lambda_1} \right) \quad (22)$$

$$P_2 = \frac{\delta_{12}}{2\pi} - \frac{\delta_{22}}{2\pi} + \left( \frac{2d (n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}{\lambda_2} \right) \quad (23)$$

donde por convención  $\lambda_1 > \lambda_2$ .

Sabiendo que la relación entre "P<sub>2</sub>" y "P<sub>1</sub>" es la siguiente:

$$P_2 = P_1 + m \quad (24)$$

donde "m" es la diferencia de ordenes entre los extremos de amplitud considerados, y los valores que puede tomar son :

$$m = 1/2, 1, 3/2, 2, \text{ etc.}$$

Resolviendo las ecuaciones (22), (23) y (24) (poniendo  $P_2 - P_1 = m$  y luego llevando el término de la derecha de la ecuación resultante para que sea de la forma de la ecuación

llegamos a "P", sumando para ello  $(\delta_{12}/2\pi - \delta_{22}/2\pi)$  a ambos lados de la ecuación llegamos a:

$$P_2 = \frac{m \lambda_1}{(\lambda_1 - \lambda_2)} + \frac{\delta_{11} \lambda_1 - \delta_{12} \lambda_2}{2 \pi (\lambda_1 - \lambda_2)} - \frac{\delta_{21} \lambda_1 - \delta_{22} \lambda_2}{2 \pi (\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (25)$$

---

*NOTA: Un hecho importante que afecta a la reflexión de la luz en una superficie de índice de refracción mayor que el medio en el cual se propaga inicialmente, queda patente con ayuda de un interferómetro de espejo de Lloyd. El resultado es que las ondas reflejadas en un medio de índice de refracción mayor que el medio en el cual se propaga inicialmente, han experimentado un cambio de fase de 180°.*

---

Como  $n_0 < n_1$ , esto implica de acuerdo con la nota anterior  $\delta_{11}$  y  $\delta_{12}$  son iguales a  $\pi$ .

Remplazando los valores en la ecuación (25) nos da:

$$\rightarrow P_2 = \frac{m \lambda_1}{(\lambda_1 - \lambda_2)} + 1/2 - \frac{\delta_{21} \lambda_1 - \delta_{22} \lambda_2}{2 \pi (\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (26)$$

$$P_2 = \frac{m \lambda_1}{(\lambda_1 - \lambda_2)} + \frac{\pi \lambda_1 - \pi \lambda_2}{2 \pi (\lambda_1 - \lambda_2)} - \frac{\delta_{21} \lambda_1 - \delta_{22} \lambda_2}{2 \pi (\lambda_1 - \lambda_2)} \rightarrow$$

o en número de onda  $\bar{v} = \frac{1}{\lambda}$

$$P_2 = \frac{m \bar{v}_2}{(\bar{v}_2 - \bar{v}_1)} + 1/2 - \frac{\delta_{21} \bar{v}_2 - \delta_{22} \bar{v}_1}{2 \pi (\bar{v}_2 - \bar{v}_1)} \quad (27)$$

A partir de las ecuaciones (18), (19), y (23) calculemos ahora el espesor de la capa

$$\delta_2 = 2 \pi P_2 = 4 \pi d_2 \frac{(n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}{\lambda_2} + \delta_{12} - \delta_{22} \rightarrow$$

epitaxial "d":

$$\rightarrow d_2 = \frac{\lambda_2}{2(n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \left( P_2 + \frac{\delta_{22}}{2\pi} - 1/2 \right) \quad (28)$$

Quedando las siguientes formulas generales:

$$d_n = \left( \frac{\lambda_n}{2(n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \right) \left( P_n + \frac{\delta_{2n}}{2\pi} - 1/2 \right) \quad (29)$$

ó

$(d_n) = \mu\text{m}$ , si trabajamos en longitudes de ando.

$$d_n = \left( \frac{1}{2\bar{v}_n(n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \right) \left( P_n + \frac{\delta_{2n}}{2\pi} - 1/2 \right) \quad (30)$$

$(d_n) = \text{cm}$ , si trabajamos en número de onda.

## 7.2 SIGNIFICADO DE LOS SÍMBOLOS

$n_0$  : índice de refracción del aire.

$n_1$  : índice de refracción de la capa epitaxial.

$n_2$  : índice de refracción del sustrato.

$n'_2$  : parte real del índice de refracción del sustrato.

$k_1$  : coeficiente de extinción ( $k = (\alpha \lambda) (4 \pi)^{-1}$  y

$\alpha$  : coeficiente de absorción ) de la capa epitaxial.

$k_2$  : coeficiente de extinción del sustrato.

$\lambda$  : longitud de onda ( $\mu\text{m}$ ).

$\bar{\nu}$  : número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ).

$\theta$  : ángulo de incidencia a la interfase aire-capa.

$\theta'$  : ángulo de incidencia a la interfase capa-sustrato.

$d$  : espesor de la capa epitaxial.

$r_{01}$  : coeficiente de reflexión de la interfase aire-capa.

$r_{12}$  : coeficiente de reflexión de la interfase capa--sustrato.

$r$  : coeficiente efectivo de amplitud de reflexión.

$R$  : reflectancia ( $R = rr^*$ ).

$\rho_{01}$  : parte real del  $r_{01}$

$\rho_{12}$  : parte real del  $r_{12}$

$\delta_{01}$  : cambio de fase en la interfase aire-capa.

$\delta_{12}$  : cambio de fase en la interfase capa-sustrato.

$\delta_C$  : fase que sale por el punto "C" de la figura N° 4.

$\delta_D$  : fase que sale por el punto "D" de la figura N° 4 .

$P_n$  : orden correspondiente a la onda de  $\lambda_n$  .

$\delta_{1n}$  : cambio de fase de la onda  $\lambda_n$  en la interfase aire--capa.

$\delta_{2n}$  : cambio de fase de la onda  $\lambda_n$  en la interfase capa--substrato.

### 7.3 Tablas

Las tablas que en este apéndice se incluyen fueron obtenidas del IBM TR 22.182<sup>(23)</sup> y del IBM TR 22.537<sup>(21)</sup> dichas publicaciones son de circulación interna de IBM y fueron obtenidas a través de una gestión personal. Dado que no son de fácil acceso se creyó conveniente reproducirlas e incluirlas en este trabajo.

Para cambio de fase para capa de Silicio sobre sustrato de Silicio de conductividad tipo "n", tablas N° 1 y 2; cambio de fase para capa de Silicio sobre sustrato de Silicio de conductividad tipo "p", tablas N° 3 y 4.

---

NOTA: Los autores tienen a disposición de quienes lo soliciten tablas correspondientes a: cambio de fase para capa de Germanio sobre sustrato de Germanio de conductividad tipo "n" y "p"; cambio de fase para capa de Arseniuro de Galio sobre sustrato de Germanio de conductividad tipo "n" y "p"; y cambio de fase para capa de Arseniuro de Galio sobre sustrato de Arseniuro de Galio de conductividad tipo "n".

---

En la tabla N° 5 se da la relación entre concentración y la resistividad para Silicio de conductividad tipo "n" y "p".

Las tablas del N° 6 al N° 15 son para Silicio de conductividad tipo "p", están dadas en longitudes de onda ( $\mu\text{m}$ ) y para ordenes que aumentan de tabla en tabla un valor de 0,5 a partir del orden 0,5 hasta el orden 5,0.

Estas tablas representan las posiciones de los máximos o mínimos (de acuerdo al orden) en función del espesor de la capa para diferentes concentraciones.

Si se conoce al orden de la franja de interferencia las tablas son de fácil utilización. Por lo general no existe dificultad alguna en asignar o calcular ordenes; sin embargo para capas muy delgadas, es posible que se obtenga una

sola franja de interferencia, en ese caso, es necesario saber cuál es el orden observado, ya que un error en la elección provocara una variación de alrededor del 100% en el valor del espesor obtenido.

Las tablas del N°16 al N°25 son similares a las del N°6 al N°15 pero para Silicio de conductividad tipo "n".

Tabla N° 1

Longitud de onda (μm)	Resistividad (Ω.cm)							
	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008
2	0,033	0,029	0,028	0,027	0,027	0,026	0,025	0,024
4	0,061	0,050	0,047	0,046	0,045	0,043	0,041	0,039
6	0,105	0,072	0,064	0,062	0,060	0,057	0,055	0,052
8	0,182	0,099	0,083	0,078	0,075	0,071	0,067	0,064
10	0,247	0,137	0,105	0,095	0,090	0,084	0,079	0,075
12	0,289	0,183	0,132	0,115	0,106	0,095	0,091	0,084
14	0,318	0,225	0,164	0,137	0,124	0,113	0,104	0,097
16	0,339	0,258	0,197	0,163	0,144	0,129	0,117	0,109
18	0,355	0,283	0,226	0,189	0,166	0,146	0,131	0,121
20	0,368	0,303	0,251	0,214	0,188	0,165	0,147	0,134
22	0,378	0,319	0,272	0,236	0,209	0,183	0,163	0,148
24	0,387	0,333	0,289	0,255	0,229	0,202	0,179	0,162
26	0,394	0,344	0,303	0,272	0,246	0,203	0,196	0,177
28	0,401	0,353	0,316	0,286	0,261	0,235	0,211	0,191
30	0,406	0,362	0,326	0,298	0,275	0,250	0,226	0,206
32	0,411	0,369	0,336	0,309	0,287	0,263	0,240	0,219
34	0,415	0,375	0,344	0,319	0,297	0,274	0,252	0,232
36	0,419	0,381	0,351	0,327	0,307	0,285	0,263	0,243
38	0,422	0,386	0,357	0,335	0,315	0,294	0,273	0,254
40	0,425	0,391	0,363	0,341	0,323	0,302	0,283	0,264

TABLA N°1. Cambio de fase (  $\delta / 2 \pi$  ) para capa de Silicio sobre Sustrato de Silicio tipo " n " .

Tabla N° 2

Longitud de onda (µm)	Resistividad (Ω.cm)						
	0,009	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020
2	0,023	0,022	0,020	0,019	0,017	0,016	0,021
4	0,038	0,036	0,034	0,031	0,029	0,027	0,025
6	0,050	0,048	0,044	0,042	0,039	0,036	0,033
8	0,061	0,059	0,054	0,051	0,047	0,043	0,040
10	0,071	0,069	0,063	0,059	0,055	0,051	0,047
12	0,081	0,078	0,072	0,067	0,062	0,057	0,053
14	0,092	0,087	0,080	0,074	0,06?	0:064	0,059
16	0,102	0,097	0,088	0,082	0,075	0,070	0,065
18	0,113	0,107	Q'096	0,089	0,082	0,076	0,070
20	0,124	0,117	0,105	0,096	0,088	0,081	0,075
22	0,136	0,127	0,113	0,104	0,095	0,087	0,081
24	0,148	0,138	0,122	0,111	0,101	0,093	0,086
26	0,161	0,150	0,131	0,119	0,108	0,099	0,091
28	0,175	0,161	0,141	0,127	0,115	0,104	0,096
30	0,188	0,173	0,150	0,135	0,121	0,110	0,101
32	0,201	0,185	0,160	0,143	0,128	0,116	0,106
34	0,213	0,197	0,170	0,151	0,135	0,122	0,112
36	0,225	0,209	0,180	0,160	0,143	0,129	0,117
38	0,236	0,220	0,191	0,167	0,150	0,135	0,123
40	0,246	0,230	0,200	0,178	0,158	0,141	0,128

**TABLA N°2. Cambio de fase (  $\delta/2\pi$  ) para capa de Silicio sobre Sustrato de Silicio tipo " n " .**

**Tabla N° 3**

Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resistividad ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )							
	0,001	0,0015	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007
2	0,036	0,034	0,033	0,033	0,033	0,034	0,034	0,033
4	0,067	0,060	0,057	0,055	0,055	0,055	0,055	0,054
6	0,119	0,091	0,082	0,076	0,074	0,073	0,072	0,071
8	0,200	0,140	0,114	0,099	0,094	0,091	0,089	0,086
10	0,261	0,199	0,156	0,127	0,115	0,110	0,105	0,102
12	0,300	0,247	0,205	0,160	0,140	0,130	0,123	0,117
14	0,327	0,282	0,244	0,194	0,167	0,152	0,141	0,133
16	0,346	0,307	0,274	0,226	0,195	0,175	0,161	0,151
18	0,361	0,327	0,297	0,253	0,221	0,198	0,182	0,168
20	0,373	0,342	0,315	0,274	0,243	0,220	0,202	0,186
22	0,383	0,354	0,330	0,292	0,263	0,240	0,220	0,204
24	0,391	0,365	0,342	0,307	0,279	0,257	0,238	0,220
26	0,398	0,374	0,352	0,320	0,294	0,272	0,253	0,236
26	0,404	0,381	0,361	0,331	0,306	0,285	0,267	0,250
30	0,409	0,387	0,369	0,340	0,316	0,297	0,279	0,262
32	0,414	0,393	0,37c	0,348	0,326	0,307	0,290	0,273
34	0,418	0,398	0,381	0,355	0,334	0,316	0,298	0,284
36	0,421	0,403	0,387	0,362	0,341	0,324	0,308	0,293
38	0,425	0,407	0,391	0,368	0,348	0,331	0,316	0,301
40	0,428	0,410	0,396	0,373	0,354	0,338	0,323	0,309

**TABLA N°3. Cambio de fase (  $\delta/2\pi$  ) para capa de Silicio sobre Sustrato de Silicio tipo " P " .**



Tabla N° 4

Longitud de onda (μm)	Resistividad (Ω.cm)							
	0,008	0,009	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020
2	0,032	0,031	0,030	0,028	0,027	0,025	0,024	0,024
4	0,052	0,050	0,049	0,045	0,043	0,040	0,038	0,037
6	0,068	0,066	0,064	0,059	0,056	0,053	0,050	0,049
S	0,063	0,080	0,077	0,072	0,067	0,064	0,060	0,059
10	0,097	0,093	0,089	0,083	0,076	0,073	0,070	0,068
12	0,111	0,106	0,101	0,094	0,088	0,063	0,078	0,076
14	0,126	0,119	0,113	0,104	0,097	0,091	0,087	0,084
16	0,141	0,132	0,126	0,115	0,106	0,100	0,094	0,091
18	0,157	0,146	0,136	0,125	0,116	0,108	0,102	0,099
20	0,173	0,160	0,151	0,136	0,125	0,117	0,110	0,106
22	0,188	0,175	0,164	0,147	0,134	0,125	0,117	0,113
24	0,204	0,189	0,177	0,158	0,144	0,133	0,125	0,120
26	0,219	0,203	0,190	0,169	0,153	0,142	0,132	0,127
28	0,233	0,217	0,203	0,180	0,163	0,150	0,140	0,134
30	0,245	0,225	0,215	0,1S1	0,173	0,159	0,148	0,141
32	0,257	0,241	0,227	0,202	0,1B2	0,167	0,155	0,148
34	0,268	0,252	0,238	0,213	0,192	0,176	0,163	0,155
36	0,277	0,262	0,246	0,223	0,201	0,185	0,171	0,162
38	0,286	0,271	0,258	0,232	0,211	0,193	0,178	0,169
40	0,294	0,280	0,266	0,241	0,219	0,201	0,186	0,176

TABLA N°4. Cambio de fase (  $\delta / 2 \pi$  ) para capa de Silicio sobre Sustrato de Silicio tipo " P " .

Tabla N° 5

TABLA N° 5. Relación entre concentración y resistividad para Sili-  
de conductividad tipo " n " y " p ".

<u>CONCENTRACION</u> ( $\text{cm}^{-3}$ )	<u>RESISTIVIDAD</u> ( $\Omega.\text{cm}$ )	
	Tipo " n "	Tipo " p "
$1 \times 10^{21}$	$2.56 \times 10^{-4}$	$1.30 \times 10^{-4}$
$5 \times 10^{20}$	$3.50 \times 10^{-4}$	$2.53 \times 10^{-4}$
$2 \times 10^{20}$	$5.50 \times 10^{-4}$	$6.13 \times 10^{-4}$
$1 \times 10^{20}$	$9.92 \times 10^{-4}$	$1.20 \times 10^{-3}$
$5 \times 10^{19}$	$1.52 \times 10^{-3}$	$2.34 \times 10^{-3}$
$2 \times 10^{19}$	$3.60 \times 10^{-3}$	$5.66 \times 10^{-3}$
$1 \times 10^{19}$	$6.90 \times 10^{-3}$	$1.06 \times 10^{-2}$
$5 \times 10^{18}$	$1.01 \times 10^{-2}$	$1.88 \times 10^{-2}$
$2 \times 10^{18}$	$1.67 \times 10^{-2}$	$3.85 \times 10^{-2}$
$1 \times 10^{18}$	$2.43 \times 10^{-2}$	$6.05 \times 10^{-2}$
$2 \times 10^{17}$	$5.82 \times 10^{-2}$	$1.72 \times 10^{-1}$
$1 \times 10^{16}$	$5.82 \times 10^{-1}$	$1.39 \times 10^0$

Tabla N° 6

N (cm <sup>-3</sup> )	λ																
	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	TIPO " p "		
																P = 0.5	
1 x 10 <sup>16</sup>	544.3	551.9	563.1	574.6	586.4	597.4	621.2	644.7	668.6	692.3	716.9	740.3	764.1				
2 x 10 <sup>16</sup>	401.4	405.3	411.8	422.4	433.1	443.8	476.4	498.5	520.3	542.3	564.1	586.0	607.5				
5 x 10 <sup>16</sup>	262.5	266.7	272.7	282.9	293.2	303.7	314.2	335.0	356.0	376.5	396.9	417.2	437.2	456.9			
1 x 10 <sup>17</sup>	190.9	194.8	200.8	210.8	220.8	230.9	241.0	261.0	280.9	300.1	319.3	338.1	356.7	375.2			
2 x 10 <sup>17</sup>	139.3	143.3	148.9	158.6	168.5	178.1	187.7	206.6	225.1	243.2	261.0	278.6	296.0	313.2			
5 x 10 <sup>17</sup>	92.58	96.33	101.9	111.1	120.3	129.3	139.1	155.5	172.5	189.2	205.7	222.0	238.3	254.5			
1 x 10 <sup>18</sup>	68.56	72.12	77.5	86.30	94.94	103.4	111.7	128.1	144.2	160.2	176.1	191.9	207.7	223.4			
2 x 10 <sup>18</sup>	51.22	54.66	59.79	68.12	76.25	84.26	92.19	107.9	123.5	139.1	154.6	170.0	185.4	200.8			
3 x 10 <sup>18</sup>	43.42	46.75	51.67	59.67	67.51	75.28	83.01	98.43	113.8	129.1	144.4	159.7	174.8	190.0			
5 x 10 <sup>18</sup>	35.41	38.53	43.11	50.63	58.13	65.63	73.16	88.23	103.3	118.3	133.3	148.3	163.2	178.0			
7 x 10 <sup>18</sup>	31.03	34.01	38.40	45.72	53.09	60.50	67.95	82.88	97.76	112.7	127.5	142.3	157.0	171.7			
1 x 10 <sup>19</sup>	27.03	29.88	34.15	41.35	48.65	56.01	63.40	78.19	92.95	107.7	122.4	137.0	151.6	166.2			
2 x 10 <sup>19</sup>	20.77	23.45	27.58	34.69	41.93	49.18	56.46	70.98	85.45	99.91	114.3	128.7	143.0	157.3			
3 x 10 <sup>19</sup>	17.91	20.56	24.70	31.80	38.99	46.19	53.39	67.77	82.10	96.41	110.7	124.9	139.1	153.2			
5 x 10 <sup>19</sup>	15.07	17.75	21.93	29.02	36.16	43.29	50.41	64.64	78.80	92.96	107.1	121.1	135.2	149.2			
7 x 10 <sup>19</sup>	13.61	16.32	20.52	27.60	34.69	41.78	48.86	62.99	77.07	91.13	105.2	119.2	133.2	147.1			
1 x 10 <sup>20</sup>	12.35	15.10	19.30	26.36	33.42	40.47	47.51	61.55	75.55	89.54	103.5	117.4	131.4	145.3			
2 x 10 <sup>20</sup>	10.58	13.35	17.54	24.55	31.54	38.52	45.49	59.41	73.30	87.16	101.0	114.8	128.7	142.5			
5 x 10 <sup>20</sup>	9.11	11.89	16.05	22.99	29.91	36.83	43.74	57.54	71.32	85.05	98.83	112.6	126.3	140.0			
1 x 10 <sup>21</sup>	8.41	11.18	15.32	22.22	29.11	36.00	42.87	56.61	70.33	84.04	97.74	111.4	125.1	138.8			

Valores de longitudes de onda para un mínimo de orden P = 0.5 para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para Silicio tipo " p " .

Tabla N° 7

$d(\mu m)$	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
$N(cm^{-3})$														
$1 \times 10^{16}$	8.68	12.12	17.25	25.72	34.07	42.37	48.20	56.00	68.62	80.82	92.65	104.6	116.0	127.5
$2 \times 10^{16}$	8.61	12.02	17.10	23.05	28.92	35.26	41.51	53.76	65.67	77.21	88.61	99.76	110.8	121.6
$5 \times 10^{16}$	8.59	11.94	16.63	21.66	28.10	34.42	40.51	52.43	63.92	75.15	86.21	97.01	107.7	118.2
$1 \times 10^{17}$	7.82	10.25	14.66	21.22	27.48	33.56	39.51	51.09	62.20	73.08	83.73	94.15	104.4	114.4
$5 \times 10^{17}$	7.42	10.10	13.93	20.55	26.60	32.44	38.15	49.19	59.81	70.10	80.08	89.78	99.24	108.5
$1 \times 10^{18}$	7.28	9.87	13.61	20.05	25.91	31.56	37.06	47.63	57.71	67.36	76.65	85.61	94.30	102.8
$2 \times 10^{18}$	7.20	9.77	13.45	19.28	24.81	30.08	35.11	44.53	53.27	61.52	69.49	77.26	84.92	92.51
$5 \times 10^{18}$	7.12	9.65	13.27	18.90	24.06	28.75	33.08	41.04	48.58	55.97	63.31	70.65	77.98	85.31
$1 \times 10^{19}$	7.08	9.58	13.02	17.78	21.67	25.27	28.80	35.90	43.06	50.24	57.45	64.67	71.89	79.11
$3 \times 10^{19}$	7.18	9.49	11.98	15.34	18.71	22.17	25.68	32.77	39.90	47.05	54.20	61.35	68.51	75.67
$7 \times 10^{19}$	7.09	8.53	10.39	13.69	17.14	20.64	24.17	31.27	38.38	45.50	52.62	59.74	66.85	73.97
$1 \times 10^{20}$	6.11	7.26	9.19	12.61	16.11	19.63	23.17	30.26	37.35	44.43	51.52	58.60	65.69	72.78
$5 \times 10^{20}$	4.90	6.20	8.26	11.75	15.27	18.80	22.32	29.39	36.45	43.51	50.57	57.62	64.69	71.73
$1 \times 10^{21}$	4.39	5.76	7.85	11.36	14.88	18.40	21.92	28.96	36.01	43.05	50.09	57.14	64.17	71.22

λ TIPO " P " P = 1.0

TABLA N° 7

Valores de longitudes de onda para un máximo de orden  $P = 1.0$  para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para Silicio tipo " p " .

Tabla N° 8

N (cm <sup>-3</sup> )	d (µm)																
	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0			
1 x 10 <sup>16</sup>	5.04	7.23	10.82	14.39	17.98	21.56	28.70	35.82	42.97	48.20	53.32	59.69	66.01				
2 x 10 <sup>16</sup>	3.63	5.06	7.22	10.82	14.43	18.00	21.58	28.73	35.53	40.37	46.79	53.25	59.63	65.87			
5 x 10 <sup>16</sup>	3.62	5.05	7.22	10.81	14.40	17.96	21.53	27.02	33.49	39.92	46.21	52.54	58.72	64.92			
1 x 10 <sup>17</sup>	3.61	5.04	7.21	10.78	14.37	17.05	20.32	26.80	33.15	39.47	45.69	51.88	57.98	64.07			
2 x 10 <sup>17</sup>	3.61	5.04	7.19	10.77	13.64	16.90	20.04	26.52	32.78	38.96	45.10	51.14	57.16	63.10			
5 x 10 <sup>17</sup>	3.60	5.03	7.18	10.21	13.46	16.67	19.84	26.07	32.20	38.24	44.18	50.06	55.85	61.59			
1 x 10 <sup>18</sup>	3.60	5.03	6.84	10.11	13.31	16.47	19.58	25.70	31.69	37.57	43.35	49.04	54.63	60.15			
2 x 10 <sup>18</sup>	3.60	4.81	6.78	10.00	13.16	16.26	19.31	25.28	31.09	36.76	42.30	47.72	53.04	58.26			
3 x 10 <sup>18</sup>	3.45	4.79	6.75	9.95	13.07	16.13	19.14	25.01	30.69	36.20	41.56	46.79	51.91	56.95			
5 x 10 <sup>18</sup>	3.45	4.77	6.72	9.90	12.99	16.00	18.95	24.65	30.10	35.34	40.41	45.37	50.25	55.08			
7 x 10 <sup>18</sup>	3.44	4.76	6.71	9.86	12.92	15.89	18.78	24.32	29.56	34.59	39.49	44.31	49.09	53.84			
1 x 10 <sup>19</sup>	3.43	4.75	6.68	9.81	12.82	15.73	18.54	23.85	28.86	33.70	38.47	43.20	47.92	52.63			
2 x 10 <sup>19</sup>	3.42	4.73	6.64	9.70	12.57	15.27	17.81	22.61	27.30	31.97	36.63	41.30	45.96	50.63			
3 x 10 <sup>19</sup>	3.42	4.72	6.61	9.59	12.32	14.82	17.19	21.83	26.46	31.11	35.75	40.40	45.05	49.70			
5 x 10 <sup>19</sup>	3.41	4.70	6.55	9.35	11.79	14.09	16.38	20.99	25.61	30.24	34.87	39.51	44.14	48.77			
7 x 10 <sup>19</sup>	3.41	4.68	6.48	9.08	11.37	13.65	15.94	20.54	25.16	29.78	34.41	39.03	43.65	48.27			
1 x 10 <sup>20</sup>	3.40	4.65	6.36	8.72	10.97	13.25	15.55	20.15	24.77	29.38	33.99	38.61	43.22	47.83			
2 x 10 <sup>20</sup>	3.36	4.50	5.89	8.11	10.38	12.68	14.97	19.58	24.18	28.78	33.38	37.97	42.57	47.17			
5 x 10 <sup>20</sup>	3.15	4.00	5.33	7.61	9.90	12.19	14.49	19.08	23.66	28.25	32.83	37.42	42.00	46.58			
1 x 10 <sup>21</sup>	2.84	3.73	5.09	7.37	9.66	11.96	14.25	18.83	23.41	27.98	32.56	37.14	41.71	46.29			

TIPO " p " P = 1.5

Valores de longitudes de onda para un mínimo de orden P = 1.5 para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para Silicio tipo " p " .

Tabla N° 9

$\frac{d(\mu m)}{N(\text{cm}^{-3})}$	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
$1 \times 10^{16}$			18.63				13.99	18.63	23.32	27.96	32.57	37.20	41.86	46.49
$2 \times 10^{16}$			18.66				13.99	18.66	23.29	27.92	32.56	37.19	41.86	46.49
$5 \times 10^{16}$			18.62				13.99	18.62	23.05	26.92	31.26	35.62	39.93	44.22
$1 \times 10^{17}$			17.98	6.99	9.32	11.66	13.97	17.98	22.40	26.72	31.04	35.38	39.66	43.89
$2 \times 10^{17}$			17.87	6.99	9.32	11.64	13.50	17.87	22.22	26.56	30.82	35.11	39.35	43.57
$5 \times 10^{17}$	2.33	3.26	4.66	6.99	9.02	11.22	13.41	17.75	22.04	26.30	30.53	34.73	38.91	43.06
$1 \times 10^{18}$	2.33	3.26	4.66	6.78	8.97	11.16	13.33	17.63	21.87	26.08	30.26	34.40	38.51	42.60
$2 \times 10^{18}$	2.33	3.26	4.54	6.74	8.93	11.09	13.24	17.49	21.68	25.83	29.94	34.00	38.03	42.01
$3 \times 10^{18}$		3.26	4.52	6.73	8.90	11.05	13.19	17.41	21.57	25.68	29.74	33.74	37.70	41.59
$5 \times 10^{18}$		3.18	4.52	6.71	8.88	11.02	13.15	17.34	21.45	25.50	29.46	33.35	37.17	40.92
$7 \times 10^{18}$		3.18	4.51	6.70	8.86	11.00	13.11	17.28	21.34	25.32	29.19	32.96	36.66	40.30
$1 \times 10^{19}$		3.17	4.50	6.68	8.84	10.97	13.07	17.19	21.18	25.03	28.77	32.41	36.00	39.55
$2 \times 10^{19}$		3.17	4.50	6.67	8.82	10.92	12.97	16.91	20.60	24.15	27.65	31.14	34.63	38.11
$3 \times 10^{19}$		3.17	4.50	6.66	8.80	10.87	12.86	16.55	20.05	23.51	26.98	30.45	33.93	37.41
$5 \times 10^{19}$		3.17	4.50	6.65	8.76	10.71	12.51	15.94	19.37	22.82	26.29	29.76	33.23	36.71
$7 \times 10^{19}$		3.17	4.50	6.65	8.67	10.46	12.16	15.56	19.00	22.46	25.93	29.40	32.87	36.34
$1 \times 10^{20}$		3.17	4.50	6.62	8.46	10.13	11.82	15.23	18.68	22.14	25.61	29.08	32.55	36.02
$2 \times 10^{20}$	2.28	3.18	4.50	6.28	7.92	9.61	11.32	14.77	18.22	21.68	25.14	28.61	32.07	35.53
$5 \times 10^{20}$	2.30	3.18	4.13	5.78	7.48	9.20	10.92	14.38	17.83	21.29	24.74	28.20	31.65	35.11
$1 \times 10^{21}$		2.89	3.87	5.57	7.29	9.01	10.74	14.19	17.64	21.09	24.54	27.99	31.45	34.90

λ TIPO " p " P = 2.0

Tabla N° 9

Valores de longitudes de onda para un máximo de orden P = 2.0 para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para Silicio tipo " p " .

$d(\mu\text{m})$ $N(\text{cm}^{-3})$	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
$1 \times 10^{16}$							10.39	13.85	17.29	20.77	24.22	27.68	31.14	34.59
$2 \times 10^{16}$														
$5 \times 10^{16}$						8.66								
$1 \times 10^{17}$				5.19	6.93	8.66								
$2 \times 10^{17}$			3.46	5.19	6.92	8.46								
$5 \times 10^{17}$			3.46	5.19	6.77	8.42								
$1 \times 10^{18}$	2.42		3.46	5.08	6.74	8.39	10.03	13.29	16.52	19.72	22.90	26.06	29.19	32.31
$2 \times 10^{18}$	2.43		3.41	5.07	6.72	8.37	10.00	13.25	16.46	19.64	22.79	25.92	29.02	32.09
$3 \times 10^{18}$	2.42		3.40	5.06	6.72	8.35	9.98	13.21	16.39	19.54	22.65	25.72	28.76	31.76
$5 \times 10^{18}$	2.39		3.39	5.06	6.71	8.34	9.96	13.17	16.34	19.45	22.52	25.54	28.51	31.44
$7 \times 10^{18}$	2.39		3.39	5.05	6.70	8.32	9.94	13.13	16.25	19.32	22.32	25.27	28.16	31.02
$1 \times 10^{19}$	2.38		3.39	5.04	6.68	8.29	9.88	13.00	16.00	18.90	21.73	24.52	27.31	30.09
$2 \times 10^{19}$	2.38		3.39	5.04	6.66	8.26	9.83	12.85	15.73	18.52	21.29	24.06	26.82	29.59
$3 \times 10^{19}$	2.38		3.38	5.03	6.64	8.20	9.70	12.54	15.29	18.04	20.80	23.56	26.32	29.08
$5 \times 10^{19}$	2.38		3.38	5.02	6.60	8.11	9.54	12.29	15.03	17.78	20.54	23.29	26.04	28.81
$7 \times 10^{19}$	2.38		3.38	4.99	6.54	7.96	9.33	12.05	14.80	17.55	20.30	23.06	25.81	28.57
$1 \times 10^{20}$	2.37		3.36	4.89	6.26	7.61	8.97	11.71	14.46	17.21	19.96	22.71	25.46	28.21
$2 \times 10^{20}$	2.36		3.25	4.58	5.93	7.30	8.67	11.42	14.17	16.91	19.66	22.41	25.15	27.90
$5 \times 10^{20}$	2.28		3.07	4.42	5.79	7.16	8.53	11.28	14.02	16.77	19.51	22.25	25.00	27.74
$1 \times 10^{21}$														

TIPO " P " P = 2.5

Tabla N° 10

Valores de longitudes de onda para un mínimo de orden  $P = 2.5$  para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para silicio tipo " p " .

Tabla N° 10



Tabla N° 12

$d(\mu\text{m})$ $N(\text{cm}^{-2})$	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
$1 \times 10^{16}$										13.75	16.05	18.34	20.63	22.92
$2 \times 10^{16}$								9.17	11.46	13.75	16.04	18.05	20.27	22.91
$5 \times 10^{16}$							6.88	9.17	11.46	13.55	15.76	17.98	20.21	22.41
$1 \times 10^{17}$							6.88	9.03	11.25	13.48	15.69	17.90	20.11	22.31
$2 \times 10^{17}$					4.58	5.73	6.77	9.00	11.22	13.43	15.64	17.84	20.03	22.21
$5 \times 10^{17}$				3.44	4.58	5.66	6.75	8.98	11.19	13.39	15.58	17.76	19.94	22.11
$1 \times 10^{18}$		2.29	3.44	4.52	5.64	6.75	8.96	11.17	13.36	15.54	17.72	19.88	22.04	
$2 \times 10^{18}$		2.29	3.41	4.52	5.63	6.75	8.96	11.17	13.36	15.54	17.72	19.88	22.04	
$3 \times 10^{18}$		2.29	3.40	4.51	5.63	6.74	8.95	11.15	13.33	15.51	17.67	19.82	21.95	
$5 \times 10^{18}$		2.29	3.39	4.51	5.63	6.73	8.94	11.13	13.31	15.47	17.62	19.75	21.87	
$7 \times 10^{18}$		2.27	3.39	4.51	5.62	6.73	8.93	11.11	13.28	15.42	17.55	19.66	21.75	
$1 \times 10^{19}$		2.27	3.39	4.50	5.61	6.72	8.90	11.06	13.19	15.28	17.34	19.36	21.37	
$2 \times 10^{19}$		2.27	3.39	4.50	5.61	6.71	8.88	11.01	13.09	15.12	17.11	19.09	21.07	
$3 \times 10^{19}$		2.27	3.39	4.50	5.60	6.69	8.82	10.87	12.86	14.83	16.79	18.75	20.72	
$5 \times 10^{19}$		2.27	3.39	4.50	5.59	6.67	8.75	10.73	12.69	14.64	16.66	18.57	20.53	
$7 \times 10^{19}$		2.27	3.38	4.49	5.59	6.67	8.75	10.73	12.69	14.64	16.66	18.57	20.53	
$1 \times 10^{20}$		2.27	3.38	4.48	5.57	6.62	8.62	10.54	12.52	14.48	16.44	18.40	20.37	
$2 \times 10^{20}$		2.26	3.37	4.45	5.45	6.42	8.36	10.32	12.27	14.23	16.20	18.16	20.12	
$5 \times 10^{20}$		2.26	3.30	4.25	5.22	6.19	8.15	10.11	12.07	14.03	15.99	17.95	19.91	
$1 \times 10^{21}$		2.22	3.17	4.14	5.11	6.09	8.05	10.01	11.97	13.92	15.88	17.84	19.80	

λ  
TIPO " p "  
P = 3.5

TABLA N° 12

Valores de longitudes de onda para un mínimo de orden  $P = 3.5$  para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para silicio tipo " p " .

Tabla N° 13

$d(\mu\text{m})$ $N(\text{cm}^{-3})$	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
	TIPO " p " P = 4.0													
$1 \times 10^{16}$									9.81	11.77	13.73	15.69	17.66	19.62
$2 \times 10^{16}$								7.85	9.81	11.77	13.73	15.69	17.66	19.62
$5 \times 10^{16}$						4.91	5.89	7.85	9.81	11.77	13.73	15.69	17.66	19.62
$1 \times 10^{17}$						4.90	5.82	7.74	9.68	11.59	13.50	15.41	17.31	19.21
$2 \times 10^{17}$				2.94	3.92	4.85	5.81	7.72	9.63	11.53	13.46	15.36	17.26	19.15
$5 \times 10^{17}$				2.94	3.88	4.84	5.80	7.71	9.61	11.51	13.40	15.31	17.20	19.08
$1 \times 10^{18}$				2.92	3.88	4.84	5.80	7.70	9.60	11.50	13.38	15.26	17.13	18.99
$2 \times 10^{18}$				2.91	3.88	4.84	5.79	7.70	9.60	11.48	13.36	15.24	17.10	18.95
$5 \times 10^{18}$				2.91	3.87	4.83	5.79	7.69	9.58	11.47	13.34	15.20	17.06	18.90
$1 \times 10^{19}$				2.91	3.87	4.83	5.79	7.68	9.56	11.43	13.28	15.11	16.91	18.70
$2 \times 10^{19}$				2.91	3.87	4.83	5.78	7.67	9.55	11.40	13.21	14.99	16.75	18.48
$3 \times 10^{19}$				2.91	3.87	4.83	5.78	7.66	9.50	11.29	13.03	14.75	16.46	18.17
$5 \times 10^{19}$				2.91	3.87	4.82	5.77	7.63	9.43	11.15	12.86	14.57	16.29	18.00
$7 \times 10^{19}$				2.91	3.87	4.82	5.76	7.58	9.30	11.00	12.70	14.42	16.13	17.85
$1 \times 10^{20}$				2.91	3.86	4.79	5.67	7.35	9.05	10.76	12.48	14.19	15.91	17.63
$2 \times 10^{20}$				2.90	3.76	4.59	5.44	7.15	8.86	10.57	12.29	14.01	15.72	17.44
$5 \times 10^{20}$				2.80	3.64	4.49	5.34	7.05	8.77	10.48	12.20	13.91	15.63	17.35
$1 \times 10^{21}$														

TABLA N° 13

Valores de longitudes de onda para un máximo de orden  $P = 4.0$  para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para Silicio tipo " p " .

Tabla N° 14

Tabla Nº 15

$d(\mu\text{m})$	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
$1 \times 10^{16}$							4.57	6.09	7.62	9.141	10.67	12.19	13.71	15.23
$2 \times 10^{16}$							4.57	6.04	7.54	9.030	10.52	12.04	13.53	15.08
$5 \times 10^{16}$							3.81	6.03	7.52	9.015	10.50	11.99	13.47	14.95
$1 \times 10^{17}$				2.29	3.05	3.81	4.53	6.02	7.52	9.006	10.49	11.97	13.45	14.93
$2 \times 10^{17}$				2.29	3.05	3.78	4.52	6.02	7.51	8.997	10.48	11.96	13.44	14.91
$5 \times 10^{17}$				2.29	3.02	3.77	4.52	6.02	7.51	8.992	10.47	11.95	13.42	14.89
$1 \times 10^{18}$				2.27	3.02	3.77	4.52	6.01	7.50	8.984	10.46	11.94	13.40	14.87
$2 \times 10^{18}$				2.27	3.02	3.77	4.52	6.01	7.49	8.970	10.44	11.90	13.36	14.80
$5 \times 10^{18}$				2.27	3.02	3.77	4.52	6.01	7.49	8.959	10.42	11.87	13.30	14.71
$1 \times 10^{19}$				2.27	3.02	3.77	4.52	6.00	7.47	8.93	10.36	11.76	13.15	14.52
$2 \times 10^{19}$				2.27	3.02	3.77	4.51	6.00	7.46	8.887	10.28	11.65	13.02	14.39
$5 \times 10^{19}$				2.27	3.02	3.77	4.51	5.98	7.42	8.799	10.16	11.53	12.89	14.26
$1 \times 10^{20}$				2.27	3.02	3.77	4.50	5.90	7.25	8.608	9.974	11.34	12.71	14.09
$2 \times 10^{20}$				2.27	3.01	3.69	4.36	5.72	7.08	8.451	9.822	11.19	12.57	13.94
$5 \times 10^{20}$				2.26	2.92	3.59	4.27	5.64	7.01	8.380	9.751	11.02	12.49	13.86

A

TIPO " p "

P = 5.0

Tabla Nº 15

Valores de longitudes de onda para un máximo de orden  $P = 5.0$  para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para silicio tipo " p " .

d (µm) N (cm <sup>-2</sup> )	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	
	1 x 10 <sup>16</sup>	503.8	363.4	368.6	377.3	386.1	522.5	531.7	541.1	560.0	578.9	597.8	617.3	635.5	649.4
2 x 10 <sup>16</sup>	360.0	238.8	243.5	251.5	259.3	386.1	394.8	403.6	421.0	438.4	455.8	473.9	490.2	510.2	526.3
5 x 10 <sup>16</sup>	235.8	170.8	173.7	178.1	185.4	259.3	267.2	275.1	290.7	306.1	321.3	336.6	351.6	369.0	381.6
1 x 10 <sup>17</sup>	170.8	125.9	130.2	137.4	144.6	192.6	199.8	206.9	221.0	235.1	249.1	263.1	277.2	290.7	305.5
2 x 10 <sup>17</sup>	123.0	83.37	87.62	94.63	101.6	144.6	151.6	158.7	172.7	186.6	200.7	214.9	229.1	242.7	258.0
5 x 10 <sup>17</sup>	80.51	61.84	66.01	72.89	79.75	101.6	108.5	115.4	129.4	143.5	157.8	172.3	186.8	201.4	216.1
1 x 10 <sup>18</sup>	59.03	43.78	46.54	50.63	57.44	79.75	86.66	93.63	107.8	122.2	136.7	151.3	166.0	180.6	195.3
2 x 10 <sup>18</sup>	43.78	36.99	39.72	43.78	50.61	64.34	71.35	78.64	92.87	107.4	122.1	136.7	151.3	166.0	180.6
3 x 10 <sup>18</sup>	36.99	30.15	31.84	36.89	43.79	57.57	64.68	71.86	86.38	101.0	115.6	130.2	144.8	159.4	174.0
5 x 10 <sup>18</sup>	30.15	26.51	29.19	33.26	40.24	50.86	58.06	65.32	79.89	94.50	109.1	123.6	138.2	152.7	167.2
7 x 10 <sup>18</sup>	26.51	23.24	25.92	30.02	37.08	47.39	54.63	61.91	76.50	91.09	105.6	120.1	134.6	149.1	163.5
1 x 10 <sup>19</sup>	23.24	17.16	20.58	24.69	31.75	44.28	51.54	58.83	73.40	87.95	102.4	116.9	131.3	145.7	160.1
2 x 10 <sup>19</sup>	17.16	15.64	18.29	22.44	29.51	38.91	46.09	53.27	67.62	81.91	96.18	110.4	124.6	138.8	152.9
3 x 10 <sup>19</sup>	15.64	13.38	16.10	20.28	27.34	36.64	43.77	50.89	65.11	79.30	93.45	107.5	121.6	135.7	149.8
5 x 10 <sup>19</sup>	13.38	12.30	15.05	19.25	26.31	34.42	41.49	48.55	62.64	76.71	90.74	104.7	118.7	132.7	146.6
7 x 10 <sup>19</sup>	12.30	11.35	14.03	18.34	25.39	33.37	40.43	47.46	61.52	75.52	89.50	103.5	117.4	131.3	145.2
1 x 10 <sup>20</sup>	11.35	9.980	12.77	16.89	23.99	32.42	39.45	46.47	60.47	74.43	88.37	102.3	116.2	130.1	143.9
2 x 10 <sup>20</sup>	9.980	8.885	11.69	15.90	22.89	30.99	37.97	44.94	58.85	72.74	86.60	100.4	114.3	128.1	141.9
5 x 10 <sup>20</sup>	8.885	8.348	11.15	15.35	22.32	29.86	36.81	43.76	57.61	71.45	85.27	99.06	112.8	126.6	140.4
1 x 10 <sup>21</sup>	8.348					29.28	36.22	43.14	56.98	70.78	84.56	98.33	112.1	125.8	139.5

λ TIPO " n " P = 0.5

Valores de longitudes de onda para un mínimo de orden P = 0.5 para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para Silicio tipo " n " .

Tabla N° 16

N(cm <sup>-3</sup> )	d(μm)																				
	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0							
1 x 10 <sup>16</sup>	17.30	25.92	34.42	42.87	45.30	58.89	72.11	84.96	97.08	110.1	122.7	134.5									
2 x 10 <sup>16</sup>	8.75	12.10	17.30	25.87	33.65	37.80	45.07	58.36	71.32	84.12	96.15	108.9	121.2	133.0							
5 x 10 <sup>16</sup>	8.73	12.13	17.29	22.99	30.56	37.46	44.25	57.65	70.46	83.09	95.45	107.5	118.8	131.1							
1 x 10 <sup>17</sup>	8.71	12.13	17.20	23.31	30.32	37.25	44.03	57.26	70.03	82.55	94.72	106.6	118.3	129.4							
2 x 10 <sup>17</sup>	8.70	12.12	15.56	22.66	29.50	36.23	42.75	55.39	67.61	79.43	90.83	101.7	112.4	122.2							
5 x 10 <sup>17</sup>	7.80	10.85	15.08	21.91	28.47	34.82	41.00	52.88	64.04	74.43	84.06	92.96	101.3	109.3							
1 x 10 <sup>18</sup>	7.66	10.61	14.72	21.30	27.61	33.68	39.51	50.36	60.08	68.78	76.78	84.39	91.76	99.01							
2 x 10 <sup>18</sup>	7.66	10.34	14.32	20.65	26.64	32.27	37.48	46.69	54.74	62.22	69.48	76.66	83.82	91.00							
3 x 10 <sup>18</sup>	7.48	10.19	14.08	20.24	25.96	31.17	35.87	44.09	51.54	58.76	65.91	73.07	80.25	87.44							
5 x 10 <sup>18</sup>	7.34	9.99	13.77	19.64	24.85	29.38	33.43	40.84	48.00	55.14	62.29	69.48	76.69	83.90							
7 x 10 <sup>18</sup>	7.25	9.84	13.53	19.12	23.88	27.99	31.76	38.95	46.08	53.23	60.41	67.62	74.84	82.07							
1 x 10 <sup>19</sup>	7.15	9.69	13.27	18.46	22.73	26.51	30.11	37.21	44.36	51.53	58.73	65.95	73.17	80.40							
2 x 10 <sup>19</sup>	7.19	9.72	12.95	16.92	20.36	23.79	27.26	34.31	41.43	48.59	55.75	62.92	70.10	77.27							
3 x 10 <sup>19</sup>	7.25	9.67	12.31	15.70	19.05	22.48	25.98	33.05	40.17	47.31	54.46	61.61	68.76	75.91							
5 x 10 <sup>19</sup>	7.30	9.14	11.10	14.33	17.73	21.21	24.73	31.82	39.94	46.06	53.18	60.31	67.43	74.56							
7 x 10 <sup>19</sup>	7.05	8.48	10.35	13.65	17.11	20.62	24.15	31.25	38.36	45.48	52.59	59.72	66.83	73.95							
1 x 10 <sup>20</sup>	6.57	7.81	9.693	13.07	16.56	20.09	23.63	30.73	37.85	44.95	52.06	59.17	66.27	73.39							
2 x 10 <sup>20</sup>	5.54	6.78	8.785	12.26	15.79	19.33	22.87	29.97	37.07	44.16	51.25	58.34	65.44	72.53							
5 x 10 <sup>20</sup>	4.66	6.02	8.118	11.65	15.20	18.75	22.29	29.39	36.48	43.57	50.67	57.75	64.85	71.94							
1 x 10 <sup>21</sup>	4.30	5.70	7.815	11.36	14.91	18.46	22.01	29.11	36.20	43.30	50.39	57.48	64.57	71.65							

TIPO " n " P = 1.0

Tabla N° 17

Valores de longitudes de onda para un máximo de orden P = 1.0 para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para Silicio tipo " n " .

Tabla N° 17

Tabla N° 18

$N(\text{cm}^{-3})$	$d(\mu\text{m})$																
	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0			
1 x 10 <sup>16</sup>		7.24	10.84	14.39	18.02	21.63	28.80	35.95	43.11	48.54	54.51	61.73	67.57				
2 x 10 <sup>16</sup>	3.63	5.07	7.24	10.82	14.40	18.02	21.61	28.77	34.50	41.14	48.08	54.29	61.35	67.28			
5 x 10 <sup>16</sup>	3.61	5.05	7.21	10.80	14.42	18.01	21.60	27.63	34.32	40.91	47.46	53.96	60.98	66.79			
1 x 10 <sup>17</sup>	3.61	5.05	7.21	10.80	14.40	17.45	20.87	27.57	34.18	40.73	47.23	53.66	60.24	66.35			
2 x 10 <sup>17</sup>	3.60	5.04	7.20	10.80	13.93	17.30	20.62	27.22	33.73	40.14	46.48	52.74	58.48	65.03			
5 x 10 <sup>17</sup>	3.60	5.04	7.19	10.41	13.74	17.04	20.31	26.74	33.04	39.22	45.28	51.22	57.04	62.73			
1 x 10 <sup>18</sup>	3.60	5.04	7.00	10.30	13.59	16.83	20.02	26.27	32.36	38.27	44.01	49.57	54.95	60.17			
2 x 10 <sup>18</sup>	3.60	4.87	6.88	10.18	13.40	16.56	19.66	25.68	31.44	36.95	42.21	47.27	52.19	57.00			
3 x 10 <sup>18</sup>	3.49	4.84	6.84	10.10	13.27	16.37	19.40	25.22	30.72	35.93	40.91	45.75	50.51	55.22			
5 x 10 <sup>18</sup>	3.47	4.81	6.78	9.98	13.09	16.10	19.00	24.50	29.62	34.49	39.25	43.95	48.64	53.32			
7 x 10 <sup>18</sup>	3.45	4.78	6.74	9.89	12.94	15.86	18.66	23.90	28.81	33.56	38.26	42.94	47.61	52.29			
1 x 10 <sup>19</sup>	3.44	4.76	6.69	9.79	12.76	15.57	18.24	23.22	27.98	32.66	37.34	42.01	46.68	51.35			
2 x 10 <sup>19</sup>	3.43	4.74	6.64	9.63	12.37	14.86	17.22	21.84	26.47	31.10	35.74	40.38	45.03	49.67			
3 x 10 <sup>19</sup>	3.42	4.72	6.59	9.45	11.95	14.27	16.56	21.15	25.77	30.40	35.03	39.66	44.29	48.92			
5 x 10 <sup>19</sup>	3.41	4.69	6.49	9.04	11.31	13.58	15.87	20.47	25.08	29.70	34.32	38.94	43.55	48.17			
7 x 10 <sup>19</sup>	3.39	4.64	6.34	8.70	10.95	13.23	15.53	20.13	24.75	29.37	33.98	38.59	43.21	47.82			
1 x 10 <sup>20</sup>	3.37	4.57	6.12	8.37	10.64	12.93	15.23	19.84	24.45	29.06	33.67	38.28	42.88	47.49			
2 x 10 <sup>20</sup>	3.28	4.30	5.63	7.89	10.18	12.48	14.79	19.39	23.99	28.60	33.20	37.79	42.39	46.99			
5 x 10 <sup>20</sup>	2.98	3.87	5.23	7.52	9.824	12.13	14.43	19.03	23.63	28.23	32.82	37.41	42.00	46.58			
1 x 10 <sup>21</sup>	2.76	3.67	5.04	7.34	9.648	11.95	14.25	18.85	23.45	28.04	32.63	37.22	41.81	46.39			

λ TIPO " n " P = 1.5

Tabla N° 18

Valores de longitudes de onda para un mínimo de orden P = 1.5 para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para Silicio tipo " n " .

$N(\text{cm}^{-3})$	$d(\mu\text{m})$	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
$1 \times 10^{16}$						9.33	11.65	13.97	18.68	23.32	27.98	32.79	37.27	41.67	45.26
$2 \times 10^{16}$					6.99	9.31	11.65	13.98	18.66	23.30	29.96	32.26	36.28	41.15	45.12
$5 \times 10^{16}$					6.99	9.33	11.65	13.99	18.64	22.87	27.26	31.72	36.15	40.82	44.99
$1 \times 10^{17}$			4.66	6.99	9.33	11.65	13.99	18.28	22.76	27.22	31.66	36.10	40.49	44.90	
$2 \times 10^{17}$		3.26	4.67	6.99	9.33	11.65	13.70	18.17	22.61	27.04	31.45	35.82	40.16	44.50	
$5 \times 10^{17}$	2.33	3.27	4.67	6.99	9.13	11.37	13.60	18.03	22.42	26.77	31.10	35.39	39.66	43.90	
$1 \times 10^{18}$	2.36	3.27	4.66	6.85	9.08	11.30	13.51	17.89	22.22	26.52	30.77	34.98	39.15	43.27	
$2 \times 10^{18}$	2.33	3.27	4.57	6.81	9.03	11.22	13.41	17.73	21.99	26.20	30.34	34.41	38.40	42.30	
$3 \times 10^{18}$	2.33	3.24	4.56	6.79	8.99	11.17	13.34	17.62	21.83	25.95	29.99	33.92	37.74	41.46	
$5 \times 10^{18}$	2.33	3.20	4.54	6.75	8.94	11.10	13.24	17.45	21.55	25.53	29.36	33.06	36.56	40.21	
$7 \times 10^{18}$	2.29	3.19	4.53	6.73	8.90	11.04	13.16	17.31	21.31	25.13	28.81	32.39	35.92	39.43	
$1 \times 10^{19}$	2.28	3.18	4.51	6.70	8.85	10.98	13.07	17.12	20.97	24.63	28.18	31.70	35.19	38.69	
$2 \times 10^{19}$	2.28	3.18	4.51	6.69	8.83	10.91	12.91	16.60	20.08	23.53	26.99	30.45	33.93	37.40	
$3 \times 10^{19}$	2.28	3.18	4.51	6.68	8.80	10.80	12.64	16.09	19.51	22.96	26.42	29.89	33.36	36.83	
$5 \times 10^{19}$	2.28	3.18	4.50	6.67	8.67	10.43	12.11	15.51	18.94	22.40	25.86	29.33	32.80	36.27	
$7 \times 10^{19}$	2.28	3.17	4.49	6.61	8.44	10.11	11.80	15.22	18.76	22.13	25.60	29.07	32.53	36.00	
$1 \times 10^{20}$	2.28	3.17	4.48	6.47	8.15	9.83	11.53	14.97	18.43	21.89	25.36	28.82	32.29	35.76	
$2 \times 10^{20}$	2.27	3.16	4.38	6.04	7.72	9.43	11.16	14.61	18.08	21.54	25.00	28.47	31.93	35.39	
$5 \times 10^{20}$	2.25	3.01	3.99	5.69	7.41	9.14	10.87	14.34	17.80	21.26	24.73	28.18	31.65	35.11	
$1 \times 10^{21}$	2.14	2.80	3.82	5.54	7.27	9.00	10.73	14.20	17.66	21.12	24.58	28.05	31.51	34.97	

λ TIPO " n " P = 2.0

Tabla N° 19

Valores de longitudes de onda para un máximo de orden  $P = 2.0$  para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para Silicio tipo " n " .

Tabla N° 19

Tabla N° 20

$d$ (nm)	$\lambda$																
	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	TIPO " n "		
$1 \times 10^{16}$								13.85	17.32	20.77	24.33	27.69	31.15	34.61	P = 2.5		
$2 \times 10^{16}$						8.69	10.38	13.86	17.30	20.76	23.83	27.20	30.58	33.87			
$5 \times 10^{16}$						8.65	10.38	13.85	17.20	20.44	23.79	27.16	30.49	33.82			
$1 \times 10^{17}$						8.65	10.39	13.64	17.00	20.34	23.68	27.00	30.30	33.62			
$2 \times 10^{17}$			3.46	5.20	6.92	8.53	10.21	13.56	16.90	20.20	23.51	26.79	30.05	33.30			
$5 \times 10^{17}$			3.46	5.19	6.82	8.49	10.17	13.49	16.79	20.07	23.33	26.56	29.78	32.97			
$1 \times 10^{18}$	1.73	2.42	3.46	5.11	6.79	8.46	10.11	13.41	16.67	19.90	23.10	26.27	29.40	32.49			
$2 \times 10^{18}$	1.73	2.42	3.42	5.10	6.77	8.43	10.08	13.35	16.58	19.77	22.92	26.03	29.09	32.10			
$3 \times 10^{18}$	1.73	2.43	3.41	5.08	6.74	8.39	10.02	13.26	16.44	19.57	22.63	25.63	28.57	31.46			
$5 \times 10^{18}$	1.73	2.39	3.40	5.07	6.72	8.36	9.981	13.18	16.32	19.39	22.37	25.29	28.15	30.98			
$7 \times 10^{18}$	1.73	2.39	3.39	5.05	6.70	8.32	9.932	13.09	16.17	19.15	22.05	24.89	27.69	30.49			
$1 \times 10^{19}$	1.71	2.39	3.39	5.04	6.68	8.28	9.855	12.88	15.75	18.54	21.30	24.06	26.82	29.59			
$3 \times 10^{19}$	1.71	2.38	3.39	5.04	6.66	8.23	9.758	12.64	15.40	18.15	20.90	23.66	26.41	29.18			
$5 \times 10^{19}$	1.71	2.38	3.38	5.02	6.60	8.11	9.519	12.25	14.99	17.74	20.49	23.35	26.00	28.76			
$7 \times 10^{19}$	1.71	2.38	3.37	4.99	6.53	7.95	9.314	12.04	14.79	17.54	20.29	23.05	25.81	28.56			
$1 \times 10^{20}$	1.70	2.37	3.36	4.95	6.40	7.76	9.121	11.86	14.61	17.36	20.12	22.87	25.63	28.38			
$2 \times 10^{20}$	1.70	2.36	3.32	4.76	6.11	7.47	8.843	11.59	14.34	17.10	19.85	22.60	25.35	28.10			
$5 \times 10^{20}$	1.68	2.31	3.15	4.51	5.88	7.25	8.625	11.38	14.13	16.88	19.63	22.38	25.13	27.88			
$1 \times 10^{21}$	1.65	2.21	3.02	4.39	5.77	7.14	8.520	11.27	14.02	16.77	19.52	22.27	25.02	27.77			

Valores de longitudes de onda para un mínimo de orden  $P = 2.5$  para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para Silicio tipo " n " .

Tabla N° 21

$N(\text{cm}^{-3})$	$d(\mu\text{m})$													
	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
$1 \times 10^{16}$										16.54	19.31	22.06	24.75	27.58
$2 \times 10^{16}$										16.55	19.30	22.07	24.75	27.56
$5 \times 10^{16}$						6.89	8.272	11.03	13.78	16.54	19.06	21.77	24.51	27.16
$1 \times 10^{17}$										16.31	19.00	21.68	24.39	27.03
$2 \times 10^{17}$					5.52					16.24	18.91	21.57	24.23	26.87
$5 \times 10^{17}$			2.76	4.14	5.52	6.90	8.180	10.88	13.56	16.17	18.82	21.46	24.09	26.71
$1 \times 10^{18}$		1.93	2.76	4.09	5.44	6.79	8.129	10.80	13.45	16.09	18.71	21.33	23.92	26.51
$2 \times 10^{18}$		1.93	2.76	4.09	5.43	6.77	8.108	10.77	13.41	16.03	18.64	21.23	23.80	26.35
$5 \times 10^{18}$		1.93	2.73	4.08	5.42	6.75	8.082	10.72	13.34	15.94	18.52	21.06	23.58	26.06
$7 \times 10^{18}$		1.93	2.73	4.07	5.41	6.74	8.062	10.69	13.29	15.87	18.41	20.91	23.37	25.80
$1 \times 10^{19}$		1.91	2.72	4.06	5.40	6.72	8.038	10.65	13.23	15.77	18.26	20.71	23.10	25.46
$2 \times 10^{19}$		1.91	2.72	4.06	5.39	6.71	8.022	10.60	13.11	15.52	17.85	20.15	22.45	24.75
$3 \times 10^{19}$		1.91	2.72	4.06	5.39	6.70	8.005	10.54	12.93	15.22	17.51	19.80	22.09	24.38
$5 \times 10^{19}$		1.91	2.72	4.06	5.38	6.69	7.954	10.32	12.58	14.86	17.14	19.43	21.73	24.02
$7 \times 10^{19}$		1.91	2.72	4.05	5.37	6.64	7.848	10.12	12.39	14.67	16.96	19.26	21.55	23.45
$1 \times 10^{20}$		1.91	2.71	4.04	5.34	6.55	7.683	9.941	12.22	14.51	16.80	19.10	21.40	23.70
$2 \times 10^{20}$		1.90	2.71	4.01	5.16	6.28	7.410	9.692	11.98	14.28	16.57	18.87	21.17	23.46
$5 \times 10^{20}$		1.89	2.66	3.79	4.92	6.06	7.207	9.502	11.80	14.10	16.39	18.69	20.99	23.28
$1 \times 10^{21}$		1.86	2.54	3.68	4.82	5.97	7.114	9.412	11.71	14.01	16.30	18.60	20.89	23.19

TABLA N° 21 λ TIPO " n " P = 3.0

Valores de longitudes de onda para un máximo de orden P = 3.0 para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para Silicio tipo " n "



Tabla N° 22

$d(\mu\text{m})$ $N(\text{cm}^{-3})$	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
$1 \times 10^{16}$									11.46	13.75	16.05	18.33	20.70	22.92
$2 \times 10^{16}$								9.169	11.46	13.76	16.04	18.34	20.66	22.87
$5 \times 10^{16}$									11.46	13.62	15.87	18.11	20.41	22.66
$1 \times 10^{17}$						5.73	6.877	9.170	11.46	13.56	15.80	18.03	20.33	22.59
$2 \times 10^{17}$				3.44	4.59	5.73	6.876	9.077	11.32	13.52	15.74	17.96	20.26	22.48
$5 \times 10^{17}$			2.29	3.44	4.54	5.67	6.806	9.052	11.29	13.47	15.67	17.87	20.17	22.38
$1 \times 10^{18}$	1.61		2.29	3.41	4.53	5.66	6.775	9.004	11.22	13.43	15.62	17.80	19.97	22.13
$2 \times 10^{18}$	1.61		2.29	3.40	4.53	5.64	6.758	8.975	11.18	13.37	15.54	17.69	19.83	21.95
$5 \times 10^{18}$	1.61		2.27	3.40	4.52	5.63	6.744	8.953	11.14	13.32	15.47	17.60	19.71	21.79
$7 \times 10^{18}$			2.27	3.39	4.51	5.62	6.729	8.926	11.10	13.25	15.38	17.47	19.54	21.58
$1 \times 10^{19}$			2.27	3.39	4.51	5.61	6.715	8.892	11.03	13.11	15.14	17.13	19.10	21.07
$2 \times 10^{19}$			2.27	3.39	4.50	5.61	6.701	8.819	10.93	12.93	14.90	16.86	18.83	20.79
$3 \times 10^{19}$			2.27	3.39	4.50	5.59	6.667	8.735	10.71	12.66	14.62	16.58	18.54	20.50
$5 \times 10^{19}$			2.27	3.38	4.48	5.56	6.614	8.607	10.56	12.51	14.47	16.43	18.40	20.36
$7 \times 10^{19}$			2.26	3.36	4.46	5.52	6.523	8.471	10.42	12.38	14.34	16.31	18.27	20.23
$1 \times 10^{20}$			2.26	3.35	4.38	5.35	6.318	8.271	10.23	12.19	14.15	16.12	18.08	20.04
$2 \times 10^{20}$			2.23	3.23	4.20	5.17	6.152	8.114	10.08	12.04	14.00	15.96	17.93	19.89
$5 \times 10^{20}$	1.56		2.16	3.14	4.11	5.09	6.075	8.038	10.00	11.96	13.93	15.89	17.85	19.87
$1 \times 10^{21}$														

λ TIPO " n " P = 3.5

Tabla N° 22

Valores de longitudes de onda para un mínimo de orden  $P = 3.5$  para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el sustrato; para silicio tipo " n " .

Tabla N° 23

$d(\mu\text{m})$ $N(\text{cm}^{-3})$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
$1 \times 10^{16}$									11.77	13.74	15.69	17.83	19.62
$2 \times 10^{16}$							7.849	9.808	11.77	13.73	15.69	17.67	19.45
$5 \times 10^{16}$						5.886	7.847	9.812	11.77	13.74	15.55	17.48	19.40
$1 \times 10^{17}$						5.886	7.788	9.722	11.65	13.62	15.50	17.41	19.33
$2 \times 10^{17}$				3.92	4.91	5.841	7.772	9.698	11.62	13.54	15.45	17.36	19.27
$5 \times 10^{17}$			2.94	3.93	4.86	5.827	7.752	9.672	11.58	13.49	15.40	17.29	19.18
$1 \times 10^{18}$		1.96	2.94	3.89	4.86	5.819	7.741	9.654	11.56	13.46	15.36	17.24	19.12
$2 \times 10^{18}$		1.96	2.92	3.89	4.85	5.809	7.723	9.629	11.53	13.42	15.30	17.17	19.03
$5 \times 10^{18}$		1.96	2.92	3.88	4.84	5.800	7.709	9.608	11.50	13.38	15.25	17.10	18.94
$7 \times 10^{18}$		1.95	2.91	3.88	4.84	5.791	7.694	9.585	11.46	13.33	15.18	17.01	18.83
$1 \times 10^{19}$		1.95	2.91	3.87	4.83	5.786	7.682	9.559	11.41	13.26	15.01	16.76	18.49
$2 \times 10^{19}$		1.95	2.91	3.87	4.83	5.781	7.670	9.527	11.34	13.09	14.81	16.53	18.24
$3 \times 10^{19}$		1.95	2.91	3.87	4.83	5.773	7.636	9.420	11.13	12.84	14.55	16.26	17.97
$5 \times 10^{19}$		1.95	2.91	3.87	4.82	5.756	7.571	9.289	10.99	12.70	14.41	16.13	17.84
$7 \times 10^{19}$		1.94	2.91	3.86	4.80	5.724	7.460	9.157	10.86	12.58	14.29	16.01	17.73
$1 \times 10^{20}$		1.94	2.90	3.84	4.72	5.564	7.260	8.970	10.69	12.40	14.12	15.84	17.56
$2 \times 10^{20}$		1.93	2.85	3.69	4.54	5.395	7.110	8.828	10.55	12.27	13.98	15.70	17.42
$5 \times 10^{20}$		1.91	2.76	3.61	4.47	5.323	7.042	8.761	10.48	12.20	13.92	15.64	17.35
$1 \times 10^{21}$													

TABLA N° 23

$\lambda$  TIPO " n " P = 4.0

Valores de longitudes de onda para un máximo de orden  $P = 4.0$  para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para Silicio tipo " n "

Tabla Nº 24

N (cm <sup>-3</sup> )	d (µm)													
	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
1 x 10 <sup>16</sup>									8.577	10.29	12.00	13.72	15.50	17.15
2 x 10 <sup>16</sup>							6.861		8.575	10.29	12.01	13.72	15.43	17.15
5 x 10 <sup>16</sup>								6.860	8.516	10.21	11.89	13.58	15.27	16.95
1 x 10 <sup>17</sup>				2.57	3.43	4.29	5.145	6.807	8.497	10.18	11.87	13.55	15.22	16.90
2 x 10 <sup>17</sup>				2.57	3.43	4.26	5.105	6.793	8.477	10.16	11.83	13.51	15.17	16.84
5 x 10 <sup>17</sup>			1.72	2.56	3.41	4.25	5.099	6.784	8.465	10.14	11.81	13.48	15.14	16.79
3 x 10 <sup>18</sup>			1.72	2.55	3.40	4.24	5.084	6.771	8.446	10.11	11.78	13.43	15.08	16.72
5 x 10 <sup>18</sup>			1.72	2.55	3.40	4.24	5.084	6.761	8.431	10.09	11.75	13.39	15.03	16.66
7 x 10 <sup>18</sup>			1.72	2.55	3.40	4.24	5.077	6.750	8.413	10.07	11.71	13.35	14.97	16.58
1 x 10 <sup>19</sup>			1.71	2.55	3.40	4.24	5.073	6.739	8.392	10.03	11.64	13.23	14.80	16.35
2 x 10 <sup>19</sup>			1.71	2.55	3.39	4.23	5.069	6.729	8.368	9.978	11.55	13.10	14.63	16.15
3 x 10 <sup>19</sup>			1.71	2.55	3.39	4.23	5.061	6.704	8.300	9.846	11.37	12.89	14.41	15.93
5 x 10 <sup>19</sup>			1.70	2.55	3.39	4.22	5.047	6.663	8.213	9.732	11.25	12.77	14.29	15.82
7 x 10 <sup>19</sup>			1.70	2.55	3.38	4.21	5.025	6.593	8.110	9.627	11.15	12.67	14.19	15.72
1 x 10 <sup>20</sup>			1.70	2.54	3.36	4.16	4.923	6.434	7.953	9.475	11.00	12.52	14.05	15.57
2 x 10 <sup>20</sup>			1.69	2.50	3.27	4.02	4.783	6.305	7.830	9.355	10.88	12.41	13.93	15.46
5 x 10 <sup>20</sup>			1.67	2.44	3.20	3.96	4.721	6.246	7.771	9.296	10.82	12.35	13.87	15.40
1 x 10 <sup>21</sup>														

TABLA Nº 24

λ TIPO " n " P = 4.5

Valores de longitudes de onda para un mínimo de orden P = 4.5 para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para Silicio tipo " n " .

Tabla Nº 25

N (cm <sup>-3</sup> )	d (µm)													
	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
1 x 10 <sup>16</sup>														
2 x 10 <sup>16</sup>														
5 x 10 <sup>16</sup>														
1 x 10 <sup>17</sup>														
2 x 10 <sup>17</sup>														
5 x 10 <sup>17</sup>														
1 x 10 <sup>18</sup>														
2 x 10 <sup>18</sup>														
3 x 10 <sup>18</sup>														
5 x 10 <sup>18</sup>														
7 x 10 <sup>18</sup>														
1 x 10 <sup>19</sup>														
2 x 10 <sup>19</sup>														
3 x 10 <sup>19</sup>														
5 x 10 <sup>19</sup>														
7 x 10 <sup>19</sup>														
1 x 10 <sup>20</sup>														
2 x 10 <sup>20</sup>														
5 x 10 <sup>20</sup>														
1 x 10 <sup>21</sup>														

TIPO " n "

P = 5.0

Valores de longitudes de onda para un máximo de orden P = 5.0 para distintos espesores y distintas concentraciones de dopante en el substrato; para Silicio tipo " n " .

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) Spitzer, W. G. and Tanenbaum, M.; "Interference method for measuring the thickness of epitaxially grown films"; Journal of Applied Physics , Vol. 32, N°3, pp. 744 - 745, 1961.
- 2) Kane, P. F. and- Larrabee, G. B.; "Characterization of semiconductors materials"; McGraw-Hill, pp. 226, 1967.
- 3) Runyan, W. R. ; "Semiconductor measurements and instrumentation"; McGraw-Hill, pp.169, 1975.
- 4) Burger, R. M. and Donovan, R.P.; "Fundamentals of Silicon integrated device technology"; Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, Vol.I, 1967.
- 5) Severin, P. J.; "On the interpretation of some measurement methods for epitaxially grown layers"; NBS Special Publication 337, pp. 224, 1970.
- 6) Gardner. E. E.; "Silicon epitaxial thickness measurements: Why and How"; Journal of Testing and Evaluation, Vol. I, N°4, pp. 301-304, 1973.
- 7) Albert, M. P. and Combs, J. F.; "Thickness measurement of epitaxial films by the infrared interference method"; Journal of The Electrochemical Society, Vol.109, N° 8, pp. 709-713, 1962.
- 8) Sato, K.; Ishikawa, Y. and Sugawara, K.; "Infrared interference spectra observed in Silicon epitaxial wafers"; Solid State Electronics, Vol.9, pp.771-781, 1966.
- 9) Severin, P. J., "On the Infrared Thickness Measurement of Epitaxially Grown Silicon Layers", Applied Optics, Vol. 9, N° 10, pp. 2381-2387, 1970
- 10)Schumann, P.A., Jr., "The infrared interference method of measuring epitaxial layer thickness" Journal of The Electrochemical Society, Vol. 116, N° 3, pp. 409-413, March 1969.
- 11)Abe, T. and Kato, T., "Infrared Reflectivity of N on N+ Si Wafers", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 4 N° 10, pp. 742-751, 1965.
- 12) Severin, P.J.; "Interpretation of the Infrared Thickness Measurement of Epitaxial Layers"; Applied Optics, Vol. 11, N° 3, pp. 691-692, 1972.
- 13) Reichard, T.E.; "Through thick and thin with infrared beams"; Electronics, pp.101-105, March 1968.
- 14) Villa, J. J.; "Additional Data on the Refractive Index of Silicon"; Applied Optics, Vol. 11, N°9, pp. 2102 -2103, 1972.
- 15) Spitzer, W. G.; Gobeli, G. W.; Trumbore, F. A.; "Effect of Heat Treatment on the Optical Properties of Heavily Doped Silicon and Germanium"; Journal of Applied Physics, Vol. 35, N° 1 pp. 206-211, 1964.
- 16) "Standard method of test for thickness of epita-layers of Silicon on substrates of the same type by infrared reflectance"; ASTM F95 - 73.

- 17) Spitzer, W. and Fan, H.Y.; "Infrared Absorption in n-Type Silicon", Physical Review, Vol.108, N<sup>o</sup>2, pp. 268-271, October 1957.
- 18) Severin, P.J. and Everstein, F.C.; "On the correction to be applied to the thickness of an epitaxial layer measured with infrared multiple interference"; Journal of The Electrochemical Society, Vol.122, N<sup>o</sup>7, pp. 962-964, 1975.
- 19) Schumann Jr., P. A. and Phillips, R. P.; "A theoretical analysis of the optical constants in extrinsic semiconductors in the infrared"; IBM TR 22.167, 1965.
- 20) Born, M. and Wolf, E.; "Principles of optics"; Pergamon Press, 1970.
- 21) Schumann, P. A. and Sakkas, C. M.; "Thickness charts for the infrared interference method of measuring Silicon epitaxial layer thickness"; IBM TR 22.537, 1968.
- 22) Schumann, P.A.; "Phase shift corrections for the measurement of Silicon epitaxial layers by the infrared interference method"; IBM TR 22.432, 1967.
- 23) Schumann, P.A. and Phillips, R.P.; "Phase shifts for epitaxial layer thickness measurements by the infrared interference method"; IBM TR 22.182, 1965.
- 24) Schumann, Jr., P.A.; "Thickness measurement of very thin epitaxial layers by the infrared reflectance"; NBS Special Publication 337, pp.234, 1970.