

CAPÍTULO 3

EL NIOBATO DE LITIO.

En este capítulo se explicarán las características electro-ópticas importantes del niobato de litio que producen cambios en sus propiedades ópticas. También se mencionará como estas propiedades son utilizadas en la tecnología de óptica integrada, siendo un ejemplo en la fabricación de moduladores electro-ópticos de intensidad^[7].

3.1 Características del niobato de Litio.

El Niobato de Litio es un material cristalino anisotrópico: lo cual significa que los índices de refracción dependen de la dirección de los ejes del cristal^[26]. El índice de refracción de un medio es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s) y la velocidad de la luz en ese medio. No tiene unidades y siempre es mayor o igual que 1^[26].

Los índices de refracción del LiNbO_3 se encuentran asociados según los ejes de la siguiente manera “x” corresponde a $n_x = n_o$, “y” a $n_y = n_o$, “z” a $n_z = n_e$. n_o y n_e son el índice ordinario y extraordinario respectivamente, tal como lo muestra la Figura 3.1.

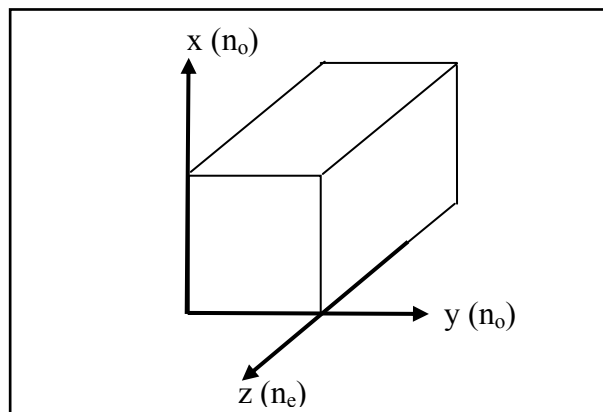


Figura 3.1 Orientación de los ejes y sus índices de refracción.

El niobato de litio se clasifica por sus características de de corte y propagación, las cuales pueden corte “Z” y propagación “Y”, corte “Z” propagación “X”^[27], corte “X” y propagación “Y” y corte “Y” y propagación “X”

El Niobato de Litio es un cristal fuertemente asimétrico, el cual puede variar el estado de polarización de la luz que lo atraviesa, con la variación de un campo eléctrico E aplicado externamente. Esta variación se sujeta a un efecto electro-óptico, que se puede explicar de la manera siguiente: Un campo eléctrico externo aplicado al cristal cambia el índice de refracción n_e y n_o según la orientación del cristal y del campo aplicado. La Figura 3.2 representa la composición del cristal, así como la variación de la constante de propagación $\beta(L)$ (tiempo de traslado de la onda) al incidir sobre el cristal un campo eléctrico E ^[25].

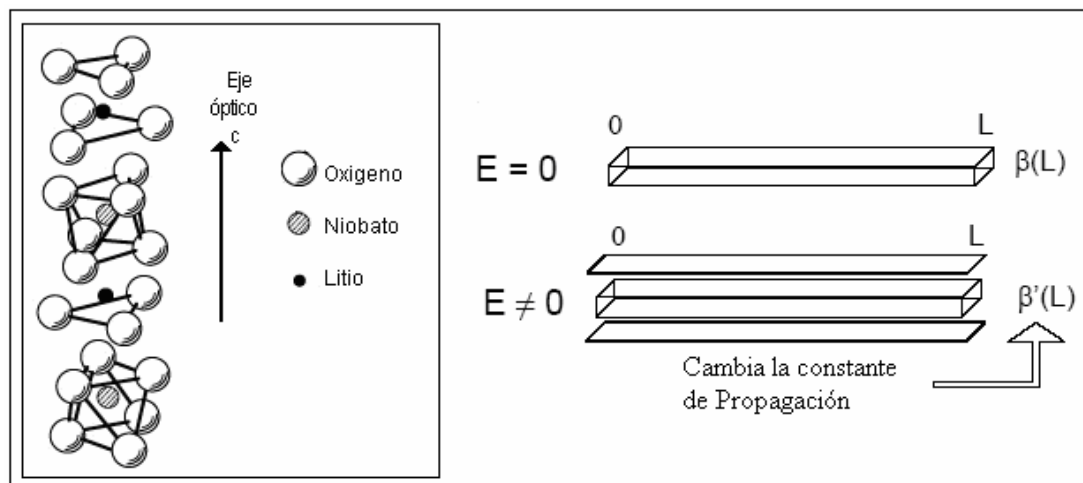


Figura 3.2 Cristal de Niobato de Litio LiNbO_3 y Cambio de la constante de propagación^[25].

El material más utilizado para la formación de componentes moduladores de intensidad, en tecnología de óptica integrada es el LiNbO_3 por su característica electro-óptica^[25].

3.2 Perfil de índices de refracción.

EL niobato de litio es un cristal anisotrópico; lo cual significa que los índices de refracción dependen de la dirección de los ejes del cristal. Es un material birrefringente con índices de refracción ordinario (n_o) y extraordinario (n_e) El eje z de un cristal uniaxial se denomina eje óptico. y al ángulo entre el eje óptico y la dirección de propagación se le denomina η . Así, en un medio anisotrópico uniaxial la luz se propaga mediante una onda ordinaria y otra extraordinaria. El índice de la onda ordinaria, n_o , es independiente de η . Los vectores del campo eléctrico, \vec{E} y el vector de desplazamiento, \vec{D} , son paralelos entre sí y perpendiculares al plano definido por el eje óptico y la dirección de propagación. Esta onda se comporta como una onda plana normal y por eso se denomina onda ordinaria. El índice de la onda extraordinaria depende de la dirección de propagación con el ángulo η ^[52]. También es un buen material electro-óptico con una transmisividad de la luz visible e infrarroja (0.4 hasta $4.5\mu\text{m}$ de longitud de onda), posee un coeficiente electro-óptico que permite crear moduladores con una respuesta rápida. El coeficiente electro-óptico, es el valor constante que tiene el cristal, para calcular la variación en la onda luminosa provocada por un campo eléctrico al recorrer el cristal de distancia “L”, por esa razón el coeficiente tiene valores de V/m , su valor depende del corte del cristal y la propagación de la onda^[28].

Según la longitud de onda de la luz propagada en el cristal (λ), los índices de refracción tienen un valor. Este valor se representa de la siguiente forma:

$$n_e^2 = A_e + \frac{B_e}{D_e + \lambda^2} + C_e \lambda^2 \quad (3.1)$$

$$n_o^2 = A_o + \frac{B_o}{D_o + \lambda^2} + C_o \lambda^2 \quad (3.2)$$

Donde los valores de las constantes del material son:

$$A_o=4.9048, \quad B_o=-0.11768, \quad C_o=-0.027169, \quad D_o=0.04750,$$

$$A_e=4.582, \quad B_e=-0.099169, \quad C_e=-0.02195, \quad D_e=0.044432.$$

λ Es la longitud de onda óptica^[29].

Considerando una longitud de onda de $1.3 \mu m$, los valores de los índices resultarían de la siguiente forma: $n_o=2.22059$ $n_e=2.14596$.

El Niobato de Litio es un cristal uniaxial con índices de refracción definidos de la forma $n_x = n_y \neq n_z$ y se representa como índice ordinario $n_o = n_x = n_y$ y el índice extraordinario $n_e = n_z$. El que el $n_e < n_o$, Cataloga al $LiNbO_3$, es un cristal uniaxial negativo^[29]

Analizando la orientación de un campo aplicado E en el cristal de $LiNbO_3$, se puede determinar la velocidad con que las ondas se propagan en este material. La propagación de una onda luminosa dentro del material de $LiNbO_3$, se puede demostrar con la siguiente ecuación en forma matricial como^[28]:

$$\begin{matrix} \hat{x} : & \hat{y} : & \hat{z} : \end{matrix} \begin{bmatrix} \omega^2 \mu_0 \epsilon_x - k_y^2 - k_z^2 & k_x k_y & k_x k_z \\ k_y k_x & \omega^2 \mu_0 \epsilon_y - k_x^2 - k_z^2 & k_y k_z \\ k_z k_x & k_z k_y & \omega^2 \mu_0 \epsilon_z - k_x^2 - k_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ox} \\ E_{oy} \\ E_{oz} \end{bmatrix} = 0 \quad (3.3)$$

Donde: ω es la frecuencia angular; $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ son permitividades dieléctrica del substrato; es μ_0 es la permitividad en el vacío. También K_x, K_y, K_z son componentes del vector de onda a lo largo de los ejes principales del cristal y E es una componente del campo eléctrico \vec{E} . Una solución para E_{ox}, E_{oy} y E_{oz} existe cuando el determinante de la matriz es cero^[28]:

$$\begin{matrix} \hat{x}: & \hat{y}: & \hat{z}: \\ \left[\begin{array}{ccc} \omega^2 \mu_0 \epsilon_x - k_y^2 - k_z^2 & k_x k_y & k_x k_z \\ k_y k_x & \omega^2 \mu_0 \epsilon_y - k_x^2 - k_z^2 & k_y k_z \\ k_z k_x & k_z k_y & \omega^2 \mu_0 \epsilon_z - k_x^2 - k_y^2 \end{array} \right] = 0 \end{matrix} \quad (3.4)$$

Esta

ecuación representa una superficie tridimensional llamada espacio de vector de onda o espacio “k”^[28]. Con la finalidad de analizar la Ec. (3.4) se eligen los planos “x-y”, “y-z” y “z-x”. De esta forma, haciendo $k_z=0$ para el plano x-y, la ecuación se reduce a^[28]:

$$\left[\begin{array}{ccc} \omega^2 \mu_0 \epsilon_x - k_y^2 & k_x k_y & 0 \\ k_y k_x & \omega^2 \mu_0 \epsilon_y - k_x^2 & 0 \\ 0 & 0 & \omega^2 \mu_0 \epsilon_z - k_x^2 - k_y^2 \end{array} \right] = 0 \quad (3.5)$$

Sabiendo que producto de “ $\mu_0 \epsilon$ ” da la velocidad de fase de la onda, esto es:

$$v \equiv \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon}} \quad (3.6)$$

La velocidad es menor dentro de un material dieléctrico con índice de refracción “n”, (para este caso sería “ n_e ” o “ n_o ”) que en vacío cuya velocidad es “c” (velocidad de la luz en el vacío) por lo que “ $v < c$ ” y el índice de refracción esta dado por $n \equiv \frac{c}{v}$. así que despejando “v” e igualándola con la ecuación (3.6) se tiene lo siguiente^[29]:

$$\frac{c}{n} \equiv \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon}} \quad (3.7)$$

Elevando al cuadrado la ecuación (3.7) para eliminar la raíz queda lo siguiente:

$$\left(\frac{n}{c}\right) = \mu_0 \varepsilon \quad (3.8)$$

Para resolver el determinante orden 3 de la ecuación (3.5) se puede hacer aplicando la regla de *SARRUS* la cual se expresa de la forma siguiente^[47]:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{31} & a_{32} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} =$$

$$=(a_{11} * a_{12} * a_{33}) + (a_{12} * a_{23} * a_{31}) + (a_{13} * a_{21} * a_{32}) - (a_{11} * a_{23} * a_{32}) - (a_{12} * a_{21} * a_{33}) - (a_{13} * a_{22} * a_{31}) \quad (3.9)$$

El desarrollo para resolver la ecuación (3.5) usando la regla *SARRUS* y sustituyendo la ecuación (3.8) en la ecuación (3.5) y considerando que ε puede tomar ε_x , ε_y , ε_z según le corresponda, queda de la siguiente forma:

$$\left(\left(\frac{n_o \omega}{c}\right)^2 - k_y^2\right) \left(\left(\frac{n_o \omega}{c}\right)^2 - k_x^2\right) \left(\left(\frac{n_e \omega}{c}\right)^2 - k_x^2 - k_y^2\right) - (k_x k_y)(k_x k_y) \left(\left(\frac{n_e \omega}{c}\right)^2 - k_x^2 - k_y^2\right) \quad (3.10)$$

De la ecuación (3.10) se toman los factores comunes y queda la siguiente ecuación expresada como el producto de dos factores:

$$\left[\left(\frac{n_e \omega}{c}\right)^2 - k_x^2 - k_y^2\right] \left\{ \left[\left(\frac{n_o \omega}{c}\right)^2 - k_y^2\right] \left[\left(\frac{n_o \omega}{c}\right)^2 - k_x^2\right] - k_x^2 k_y^2 \right\} = 0 \quad (3.11)$$

Uno u otro factor de la Ec (3.11) o ambos deben ser iguales a cero. Si el segundo factor es igual a cero, entonces la ecuación resultante es^[28]:

$$k_x^2 + k_y^2 \equiv \left(\frac{n_o \omega}{c} \right)^2 \quad (3.12)$$

La ecuación (3.12) representa un círculo,

$$\frac{k_x^2}{\left(\frac{n_o \omega}{c} \right)^2} + \frac{k_y^2}{\left(\frac{n_o \omega}{c} \right)^2} \equiv 1 \quad (3.13)$$

Lo que indica que el niobato de Litio tiene dos índices de refracción iguales el del plano “x” y “y” n_x y n_y respectivamente.

Para los planos y-z con $k_x = 0$, y x-z con $k_y = 0$, se realiza el mismo procedimiento que se hizo para el plano x-y, obteniéndose lo siguiente^[28]:

$$\text{Plano y-z} \quad k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{n_o \omega}{c} \right)^2 \text{ círculo} \quad (3.14)$$

$$\frac{k_y^2}{\left(\frac{n_e \omega}{c} \right)^2} + \frac{k_z^2}{\left(\frac{n_o \omega}{c} \right)^2} = 1 \longrightarrow \text{elipse} \quad (3.15)$$

$$\text{Plano x-z} \quad k_x^2 + k_z^2 = \left(\frac{n_o \omega}{c} \right)^2 \longrightarrow \text{círculo} \quad (3.16)$$

$$\frac{k_x^2}{\left(\frac{n_e \omega}{c} \right)^2} + \frac{k_z^2}{\left(\frac{n_o \omega}{c} \right)^2} = 1 \longrightarrow \text{elipse} \quad (3.17)$$

De la ecuación. (3.13) y (3.16) se obtiene la gráfica de la Figura 3.2, que muestra la superficie en el espacio k, la cual describe para el Niobato dos capas (interior y exterior). La esfera corresponde a la propagación electromagnética en cuanto al índice de refracción ordinario n_o . La elipsoide corresponde a la propagación en el índice de refracción extraordinario n_e ^[28].

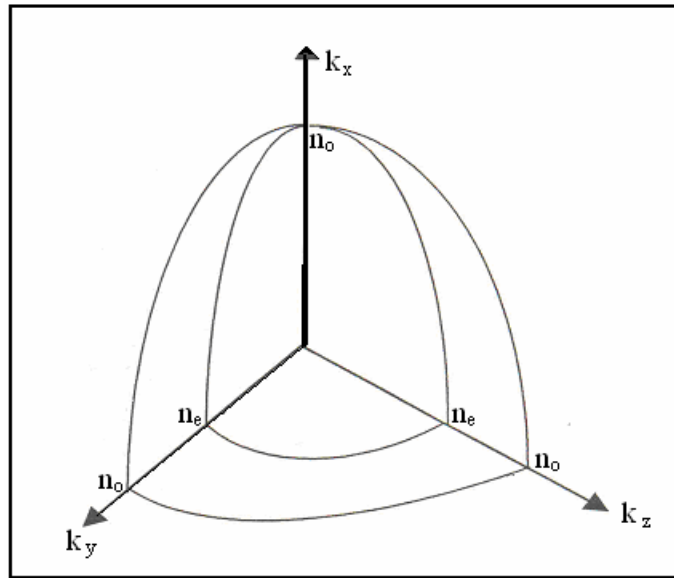


Figura 3.3 Elipsoide de índices de refracción^[28].

La interacción electro óptica en el Niobato de Litio puede ser descrita mediante la elipse de índices de refracción, mostrada en la Figura 3.4. El cambio en el índice de refracción debido al efecto electro óptico lineal es representado por cambios en los componentes de la matriz óptica. El efecto electro-óptico es descrito en términos de un tensor de tercer rango, llamado coeficiente electro-óptico (r_{ij}), el cual representa la dependencia lineal de los coeficientes de refracción, cuando se aplica un campo eléctrico al cristal. Donde $i=1,2,3$, $j=1,2,3$, y $1,2,3$, representan las diferentes direcciones “x”, “y”, “z” del cristal del LiNbO_3 .

El LiNbO_3 es un cristal orientado en los ejes “x”, “y” y “z”, cuya matriz de coeficientes electro-ópticos es de la forma ^[30]:

$$\begin{array}{c}
 x \quad y \quad z \\
 \left[\begin{array}{ccc}
 0 & -r_{22} & r_{13} \\
 0 & r_{22} & r_{13} \\
 0 & 0 & r_{33} \\
 0 & r_{51} & 0 \\
 r_{51} & 0 & 0 \\
 -r_{22} & 0 & 0
 \end{array} \right]
 \end{array} \quad (3.18)$$

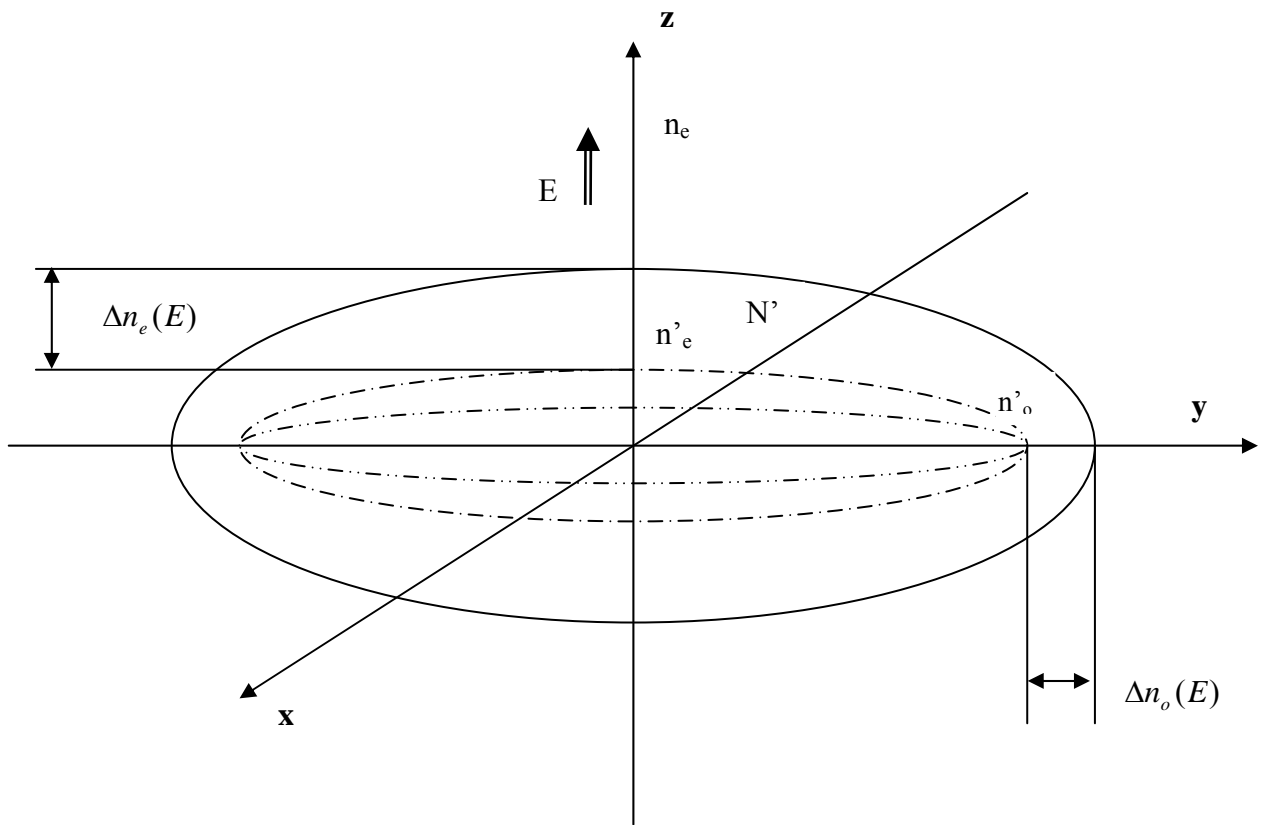


Figura (3.4) Elipse de índices de refracción en el LiNbO_3 ^[30].

La elipse de índices de refracción en general tiene la forma:

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad (3.19)$$

Donde “x”, “y”, “z” son las direcciones asociadas a los ejes del cristal y sus correspondientes índices de refracción n_x , n_y , n_z .

Para el LiNbO_3 , que es un cristal uniaxial $n_o = n_x = n_y$ y $n_e = n_z$. La ecuación de índice elipsoidal se reduce entonces a^[30]:

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \quad (3.20)$$

Donde n_o y n_e , son los índices ordinario y extraordinario del material, respectivamente. La aplicación de un campo eléctrico en el LiNbO_3 resulta en un cambio en el tamaño y la orientación del índice elipsoidal, lo cual se observa en la Figura 3.4^[30].

La variación de los índices ordinario $n'_e - n_e = \Delta n_e$ es función del campo eléctrico “E” aplicado y también la variación de los índices ordinario $n'_o - n_o = \Delta n_o$ es función del campo eléctrico “E” aplicado.

En general, la elipse de índices de refracción, en presencia de un campo eléctrico con componentes E_x , E_y , E_z , está dada por^[30]:

$$\begin{aligned} x^2 \left(\frac{1}{n_o^2} - r_{22} E_y + r_{12} E_z \right)_1 + 2yz (r_{51} E_y)_4 + y^2 \left(\frac{1}{n_o^2} - r_{22} E_y + r_{13} E_z \right)_2 + 2zx (r_{51} E_x)_5 + \\ z^2 \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33} E_z \right)_3 - 2xy (r_{22} E_x)_6 = 1 \end{aligned} \quad (3.21)$$

Donde E_x , E_y , E_z , es la componente del campo eléctrico dirigido en su correspondiente eje “x”, “y” y “z”.

El campo eléctrico puede estar emitido en una sola dirección y en particular, cuando está únicamente en la dirección “z” (E_z). la elipsoide de índices de refracción representada en la ecuación (3.21) queda de la siguiente forma^[30]:

$$x^2 \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13} E_z \right) + y^2 \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13} E_z \right) + z^2 \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33} E_z \right) = 1 \quad (3.22)$$

En general, el producto de “ r_{ij} ” por “E” es un número mucho menor que la unidad, por lo que el otro término dentro de los paréntesis es mucho menor que n_o y n_e ^[31]. De este modo, cuando el campo eléctrico está únicamente en la dirección z(E_z) y representado en la ecuación (3.22) puede ser aproximado quedando como sigue:

$$\frac{x^2}{\left(n_o - \frac{n_o^3}{2} r_{13} E_z \right)^2} + \frac{y^2}{\left(n_o - \frac{n_o^3}{2} r_{13} E_z \right)^2} + \frac{z^2}{\left(n_e - \frac{n_e^3}{2} r_{33} E_z \right)^2} = 1 \quad (3.23)$$

La ecuación (3.23) es la expresión de la indicatriz del elipsoide de índices de refracción. La indicatriz se puede variar en función del campo eléctrico E_z . Las constantes electro ópticas del LiNbO_3 son $r_{33}=30.8 \cdot 10^{-12}$ m/V y $r_{13}=8.6 \cdot 10^{-12}$ m/V para $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$. Los índices de refracción correspondientes son^[31]:

$$n_x = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 (r_{13} E_z) \quad (3.24)$$

$$n_y = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 (r_{13} E_z) \quad (3.25)$$

$$n_z = n_e - \frac{1}{2} n_e^3 (r_{33} E_z) \quad (3.26)$$

y la variación inducida por el campo eléctrico es de la forma:

$$\Delta n_o(E_z) = -\frac{1}{2} r_{13} n_o^3 E_z \quad (3.27)$$

$$\Delta n_e(E_z) = -\frac{1}{2} r_{33} n_e^3 E_z \quad (3.28)$$

De acuerdo a las ecuaciones (3.27) y (3.28) se expresa que cuando se aplica un campo eléctrico en dirección z , los índices ordinario y extraordinario se modifican proporcionalmente con los coeficientes electro-ópticos asociados a dicha dirección ^[31].

3.3 Aplicación del efecto Pockels en LiNbO₃.

Con el nombre de óptica integrada, se designa al proceso de integración de componentes pasivos y activos en un mismo conjunto (chip), con tecnología planar. Esta consiste de una o más guías de onda ópticas, fabricadas típicamente en el material electro-óptico de LiNbO₃. El niobato de litio presenta un efecto electro-óptico lineal, también conocido como efecto Pockels. ^[32].

Esta modificación del cambio de los índices de refracción, se ve como una modulación de la luz, la cual se logra mediante la aplicación de un campo eléctrico externo utilizando electrodos metálicos coplanares situados a lo largo de la guía de onda óptica. La estructura de un modulador electro-óptico en dos tipos de corte transversal se muestra en la Figura 3.5^[31].

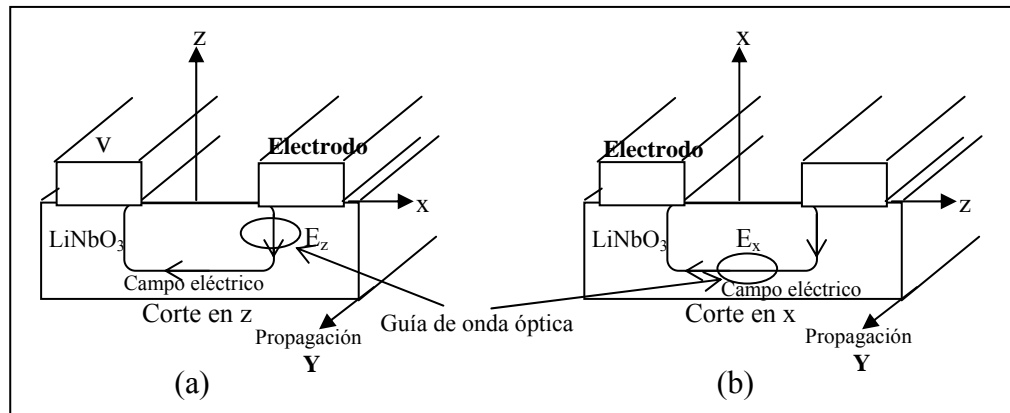


Figura 3.5. Geometría típica de moduladores electro-ópticos en un sustrato de niobato de litio, a) Corte en “z” y propagación “y”, b) Corte en “x” y propagación “y”^[31].

La Figura 3.5 (a) muestra una estructura con sustrato en corte “z”, donde la guía de onda óptica se localiza bajo el borde interno de uno de los electrodos. Esto se debe a que en este caso el campo eléctrico es perpendicular a la superficie del sustrato aprovechando el coeficiente electro-óptico r_{33} , a favor de la modulación óptica. Para el caso de la Figura 3.5 (b), correspondiente a un sustrato en corte “x”, la posición de la guía de onda óptica es exactamente en el centro de separación de los electrodos. Aquí el campo eléctrico es paralelo a la superficie del sustrato, lo que permite aprovechar el coeficiente electro-óptico r_{13} . La eficiencia del modulador depende de la posición relativa de los electrodos y de la guía de onda óptica^[31].

En un material anisotrópico como el niobato de litio, las variaciones de los índices de refracción depende de la interacción entre el campo eléctrico aplicado y los campos ópticos propagados en la guía de onda óptica. En el niobato de litio los índices de refracción cambian según los ejes “x”, “y”, “z” del cristal de manera proporcional a los coeficientes electro-ópticos asociados a tales direcciones.

La variación de los índices de refracción, provoca que cuando la luz que se propaga en este material, acumula un cambio de fase $\Delta\phi$, que puede expresarse de la siguiente forma^[33]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta nL}{\lambda} \quad . (3.29)$$

Donde de forma general se tiene que Δn es la variación del coeficiente de refracción debida al campo externo aplicado. y su formula es:

$$\Delta n = -\frac{1}{2}rn^3E \quad (3.30)$$

Y “L” es la longitud del material donde se propaga (longitud del cristal de LiNbO₃) y “ λ ” es la longitud de la onda que se propaga.

Sustituyendo la ecuación (3.30) en (3.29) queda:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L \left(-\frac{1}{2}rn^3E \right)}{\lambda} \quad (3.31)$$

La modulación de la fase se logra por lo tanto aplicando un voltaje V(t). Quedando la modulación definida como:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n^3 r\Gamma}{\lambda 2S} lV(t) = \frac{\pi n^3 r\Gamma}{\lambda S} lV(t) \quad . (3.32)$$

Donde n es el índice de refracción, r es el coeficiente electro-óptico del LiNbO₃ en la dirección “z” o “x”, ‘S’ es la separación entre los electrodos, “l” es la longitud de los electrodos, Γ es el coeficiente de recubrimiento entre el campo eléctrico y el campo óptico, V(t) es el voltaje aplicado, el cual representa una señal de información (audio, video, datos, etc.)^[33].

La ecuación (3.32) representa que el cambio de fase esta en función del voltaje aplicado al modulador. La Figura 3.6 muestra al modulador desde una vista superior, de un corte en 'x' y propagación 'y'.

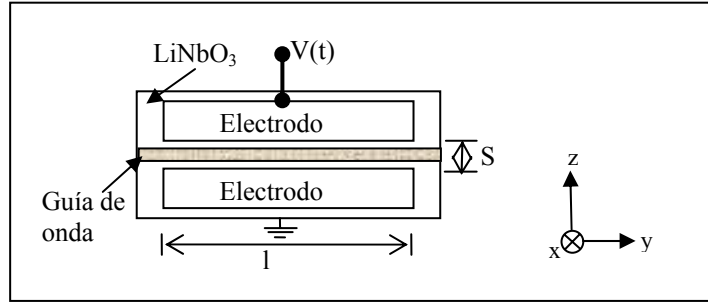


Figura 3.6 Modulador de fase con una guía de onda óptica y electrodos de modulación^[33].

Al utilizar óptica integrada se pueden obtener con bajos voltajes en los electrodos una modulación de fase considerable, ya que se logra con 5volts un cambio de fase de 180^o^[32].

3.3.1 Voltaje de Media onda (V_{π}).

De la ecuación (3.32) se define el rango de operación de los moduladores electro-ópticos, denominado el voltaje de media onda, el cual es el voltaje requerido para inducir un cambio de fase de π radianes. por lo cual la solución de la ecuación (3.32) es π y despejando el Valor de $V(t)$ con el cambio de fase de π se contiene la ecuación de V_{π} . A continuación se desarrolla el despeje para encontrar la ecuación de V_{π} .

$$\Delta\varphi = \pi = \frac{\pi n^3 r \Gamma}{\lambda S} l V(t) \quad \text{despejando el valor de } V(t) \text{ se tiene :}$$

$$l V(t) = \pi \left(\frac{\lambda S}{\pi n^3 r \Gamma} \right) = \frac{\lambda S}{n^3 r \Gamma} = V_{\pi} \quad . (3.33)$$

V_π , es un valor importante para saber el rango de operación, de los moduladores electro-ópticos y dependiendo su corte y propagación :su resultado está dado por la siguiente ecuación ^[34]

$$\text{a) corte en z propagación y} \quad V_\pi = \frac{\lambda S}{n_e^3 r_{33} \Gamma_{TM} l} \quad . (3.34)$$

$$\text{b) corte en x propagación y} \quad V_\pi = \frac{\lambda S}{n_o^3 r_{13} \Gamma_{TE} l} \quad . (3.35)$$

Donde r_{33} y r_{13} son los coeficientes electro-ópticos, Γ_{TM} , Γ_{TE} son los coeficientes de superposición magnético y eléctrico respectivamente y son valores constantes que indican la relación que existe entre el campo de la honda y el campo aplicado externamente.

La Figura 3.7 muestra un esquema de la variación de fase al aplicar una señal $V(t)$ a los electrodos del modulador. ^[34].

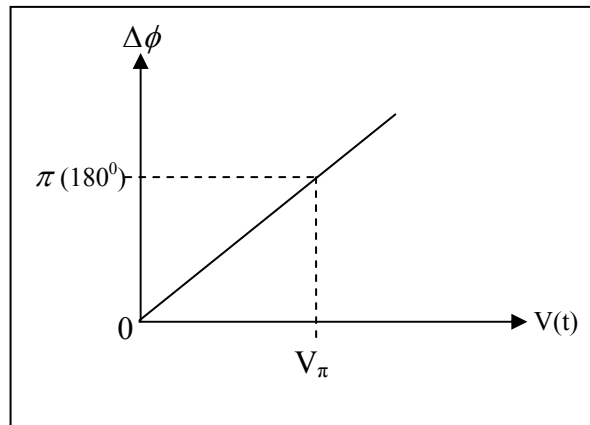


Figura 3.7 Variación de $V(t)$ para obtener el valor V_π , que equivale a la variación de fase igual a π radianes (180°)^[34].

V_π en un corte en “z” y propagación en “y” tiene un valor de voltaje menor al de V_π en un corte en “x” y propagación en “y”, teniendo un modulador con las características

físicas idénticas de los electrodos, esto se debe a los valores del coeficientes electro-óptico hacen más sensible al corte “z” y propagación en “y” que al “x” y propagación en “y” ($r_{33}=30.8*10^{-12}$ m/V y $r_{13}=8.6*10^{-12}$ m/V). Los coeficientes electro ópticos están relacionados a una dirección de propagación específica dirección de propagación y corte del cristal y el valor V_{π} indica el valor de voltaje requerido para variar la fase 180° . El modulador es más sensible al voltaje aplicado en los electrodos para efectuar el cambio de fase de la onda que lo atraviesa, con valor de V_{π} menor^[31].

3.4 Conclusión.

EL niobato de litio es un cristal que presenta un efecto electro-óptico llamado efecto Pockels, en el cual sus índices de refracción se ven alterados al aplicarle al cristal un campo eléctrico constante dependiendo de la dirección del corte y de la propagación tiene un diferente valor de coeficiente electromagnético predominante y el corte en “x” y propagación en “y” presenta una respuesta sensibilidad mayor ante la presencia del campo eléctrico externo. El efecto Pockels presentado en el cristal provoca que al variarse los índices de refracción la onda luminosa que recorre el cristal, sea alterada en su fase y al valor de voltaje necesario para generar el campo eléctrico tal que el desfaseamiento de la onda sea de π radianes (180°) se le denomina V_{π} . Este valor V_{π} es el mismo que se usa para poder saber el rango de operación de los moduladores electro-ópticos que se estudiarán en el siguiente capítulo.