

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA  
DE TELECOMUNICACIÓ DE BARCELONA

**Caracterització, modelat i  
aplicacions dels moduladors  
de polarització birefringent  
de  $\text{LiNbO}_3$**

**Autor**

Joan Miquel Piñol Jurado

**Directors**

José A. Lázaro Villa

Josep M. Fàbrega Sánchez

**Grup de Comunicacions Òptiques  
Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions**



***"L'única cosa realment  
valuosa és la intuïció"***

Albert Einstein



# Agraïments

Aquest projecte és el resultat del treball realitzat en el Grup de Comunicacions Òptiques (GCO) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). La seva realització no hagués estat possible sense el suport i ajut d'algunes persones que m'agradaria esmentar aquí.

Desitjo expressar el meu agraïment als directors del projecte, en José Antonio Lázaro i en Josep Maria Fàbrega, pel suport i col·laboració que he rebut d'ells. Vull lloar la paciència i generositat que sempre han mostrat i agrair-los els ànims que sempre han volgut contagiar-me per a fer-me una mica més suportables les dificultats que he anat trobant pel camí.

També vull expressar el meu agraïment a en Victor, que m'ha prestat la seva ajuda desinteressada en les tasques de laboratori. Amb la seva paciència infinita m'ha escoltat i aconsellat en tot moment.

Durant la meva estada al Grup de Comunicacions Òptiques he gaudit de la companyia d'amics que no vull oblidar en aquest moment. Particularment grata ha estat la convivència amb el Francesc i en Miquel, amb els quals he compartit bons petits moments cada dia, que mereixen sens dubte aquest recordatori.

Igualment, voldria expressar la meva amicitat a la resta de companys del laboratori que en algun moment m'han aportat la seva ajuda i consell; a tots ells gràcies.

Finalment, a la meva família que sempre ha estat al meu costat, donant-me el seu suport incondicional. Ells m'han ensenyat, amb el seu exemple i dedicació, que la perseverança i l'esforç són el camí per a assolir els objectius.

**Joan Miquel Piñol Jurado**

Barcelona, 25 de Juny de 2008



# Índex

<b>Índex .....</b>	<b>7</b>
<b>1. Introducció .....</b>	<b>9</b>
1.1. Antecedents .....	9
1.2. Per què apostar per la fibra òptica .....	11
1.3. Desenvolupament de la modulació de polarització .....	13
1.4. Objectius .....	14
1.5. Organització del projecte .....	15
<b>2. La polarització de la llum .....</b>	<b>17</b>
2.1. Introducció .....	17
2.2. Tipus de polaritzacions .....	18
2.2.1. Polarització lineal .....	19
2.2.2. Polarització circular .....	19
2.2.3. Polarització el·líptica.....	20
2.3. Vectors i matrius de Jones.....	21
2.4. Llum natural, llum parcialment polaritzada i grau de polarització.....	23
2.5. Paràmetres d'Stokes i matrius de Muller .....	25
2.6. L'esfera de Poincaré .....	27
<b>3. Moduladors electroòptics .....</b>	<b>31</b>
3.1. Introducció .....	31
3.2. Propietats dels medis òptics .....	32
3.2.1. L'efecte Pockels .....	32
3.2.2. La birefringència.....	34
3.2.3. Polarization Mode Dispersion (PMD) .....	35
3.3. El Niobat de Liti.....	36
3.4. Tipus de modulacions electroòptiques.....	38
3.4.1. Modulació de fase (PSK).....	38
3.4.2. Modulació d'amplitud (ASK).....	41
3.4.3. Modulació de freqüència (FSK).....	44

3.4.4. Modulació de polarització (PoISK) .....	46
<b>4. Caracterització del modulador de polarització .....</b>	<b>61</b>
4.1. Introducció .....	61
4.2. Estudis previs .....	62
4.2.1. Comportament fibres mantenidores .....	62
4.2.2. El polarímetre .....	64
4.2.3. Polarització de sortida del làser .....	64
4.3. Caracterització amb el polarímetre. ....	66
4.4. Comprovació del funcionament del modulador a freqüències de GHz ..	74
4.5. Mesura del voltatge de mitja ona ( $V\pi$ ) .....	76
4.6. Ús del modulador de polarització com a modulador de fase. ....	82
4.6.1. Mesura del $V\pi e$ del modulador .....	88
4.6.2. Mesura del $V\pi o$ del modulador .....	95
<b>5. Conclusions .....</b>	<b>99</b>
<b>Annexos.....</b>	<b>101</b>
Annex 1. Modulador de polarització .....	101
Annex 2. Disseny d'un controlador de polarització manual .....	105
<b>Referències .....</b>	<b>117</b>
<b>Índex de figures .....</b>	<b>123</b>
<b>Índex de taules.....</b>	<b>129</b>
<b>Acrònims .....</b>	<b>131</b>



# 1. Introducció

La realització del projecte s'emmarca en l'àmbit de les comunicacions òptiques. Es tracta de caracteritzar un dispositiu electroòptic basat en òptica integrada. Concretament, l'objectiu és especificar el comportament d'un modulador de polarització electroòptic de Niobat de Liti i estudiar les seves possibilitats i aplicacions.

Paral·lelament, també es durà a terme el disseny d'un sistema que permeti controlar la polarització de la llum, dispositiu indispensable per tal de caracteritzar adequadament el modulador de polarització.

## 1.1. Antecedents

El progrés de les comunicacions per fibra òptica ha avançat molt en els últims anys. Al 1960 es va inventar el làser, però la falta d'un medi adequat per a transmetre les ones electromagnètiques feien difícil aplicar aquesta tecnologia per a la transmissió de dades. Va ser llavors quan els científics van dirigir els seus esforços a la producció d'un canal adequat per a aquest tipus de comunicacions, i van obtenir el que avui és conegut com a fibra òptica.

Inicialment, les fibres òptiques que es produïen tenien grans pèrdues (1000dB/km) a causa de la presència d'impureses en el vidre de silici utilitzat per a fabricar-les. Però ben aviat, es van anar refinant els mètodes de fabricació per tal de disminuir la concentració d'aquestes impureses.

A partir de 1970 es va desencadenar una pugna entre els diferents grups d'investigació per a reduir les pèrdues als nivells teòrics. Es va passar de

treballar a  $0.85 \mu\text{m}$  (primera finestra) a treballar a  $1.3 \mu\text{m}$  i  $1.55 \mu\text{m}$  (segona i tercera finestra) obtenint atenuacions de 17 dB/km (1970), 2 dB/km (1975), 0.5 dB/km (1976) i 0.2 dB/km (1979).

La disponibilitat d'un medi de comunicacions d'atenuació baixa i de fonts i detectors de llum basats en la tecnologia de semiconductors van afavorir el desenvolupament de les comunicacions òptiques. Aquest procés de millora dels sistemes de comunicació òptics va començar a la dècada dels 70 i encara segueix avançant fins al dia d'avui. (1)

El resultat de la investigació i dels recents descobriments en l'àmbit de les comunicacions òptiques ha fet que la nostra capacitat de transmetre informació augmenti, sobretot, gracies a l'evolució en els medis de difusió emprats. La evolució des dels fils de coure de fa un segle als actuals cables de fibra òptica han fet incrementar la nostra capacitat de transmetre informació, més ràpidament i a més llarga distància, tot ampliant les fronteres del desenvolupament tecnològic en tots els àmbits.

A dia d'avui, la fibra òptica de vidre, amb pèrdues molt baixes, ens ofereix un ample de banda gairebé il·limitat i una sèrie d'avantatges únics respecte altres mitjans de transmissió.

La base dels sistemes de transmissió per fibra òptica consisteix en tres elements bàsics: el transmissor òptic, el cable de fibra òptica i el receptor òptic.

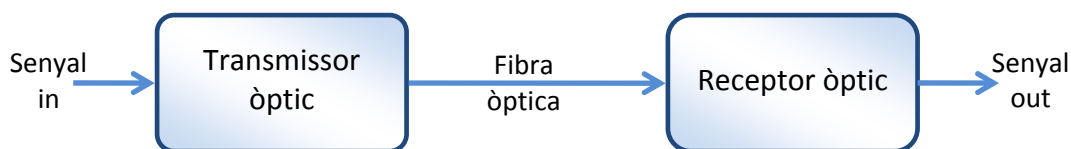


Fig. 1.1 Sistema bàsic de transmissió per fibra òptica

El **transmissor òptic**: El transmissor converteix un senyal analògic o digital elèctric en el senyal òptic corresponent. La font del senyal òptic pot ser o un díode electroluminiscent (LED) o un làser. Les longituds d'ona més populars d'operació per a transmissors òptics són 850, 1300 o 1550 nanòmetres.

El **cable de fibra òptica**: El cable consta d'una o més fibres de vidre, que serveixen de guies d'ones per als senyals òptics.

El **receptor òptic**: El receptor converteix el senyal òptic, altra vegada, en una rèplica del senyal elèctric original. El detector del senyal òptic és o un fotodíode tipus PIN o APD.

## 1.2. Per què apostar per la fibra òptica

Existeixen moltes raons per les quals les empreses de telecomunicacions prefereixen la fibra òptica com a medi de transmissió. Les principals raons d'aquesta elecció són el cost, la eficiència i la conveniència.

Utilitzar la llum com a mode de transmissió de la informació porta, en sí mateix, una gran quantitat d'avantatges respecte els sistemes tradicionals de transmissió mitjançant cable de coure o cable coaxial. Aquestes s'exposen a continuació.

- **Gran capacitat.** L'elevat ample de banda de les fibres òptiques, al voltant d'1THz, permet la transmissió de dades a taxes de transmissió de fins a 32THz·Km excedint àmpliament les taxes dels cables de coure. A la fig. 1.2 podem observar les taxes de transmissió de diferents tecnologies i la distància a què poden arribar a transmetre sense necessitat de regeneradors. Veiem que la transmissió per fibra òptica és la solució que permet un ample de banda més gran a una distància major.

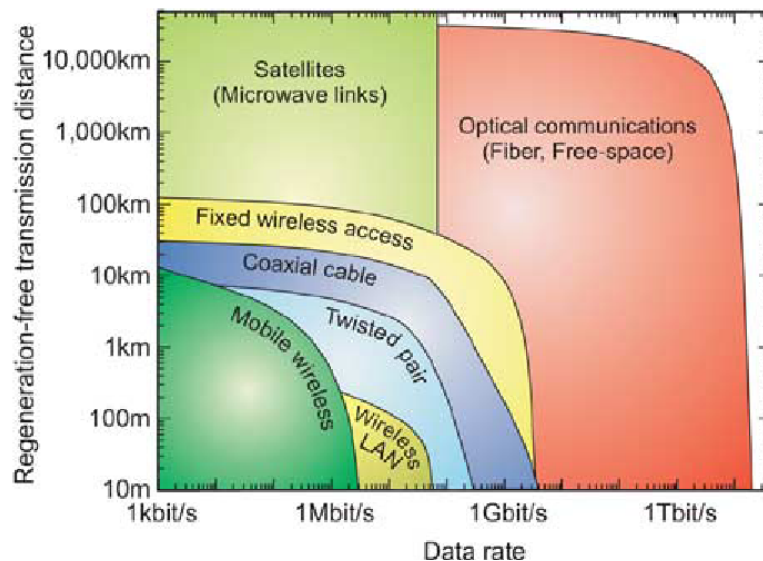


Fig. 1.2 Comparació de les taxes de transmissió en funció de la distància de diferents tecnologies de comunicació

- La **baixa atenuació** que presenten les fibres, per exemple, en tercera finestra l'atenuació és de 0.2 dB/km, permet utilitzar enllaços de fins a 100 km sense necessitat d'amplificadors o regeneradors. En canvi, en cables coaxials es requereixen amplificadors aproximadament cada 2 km. A més a més, els sistemes òptics requereixen menor potència de transmissió. La figura següent mostra l'atenuació de la fibra en funció de

la longitud d'ona i remarca les diferents finestres que s'utilitzen per a transmetre la informació.

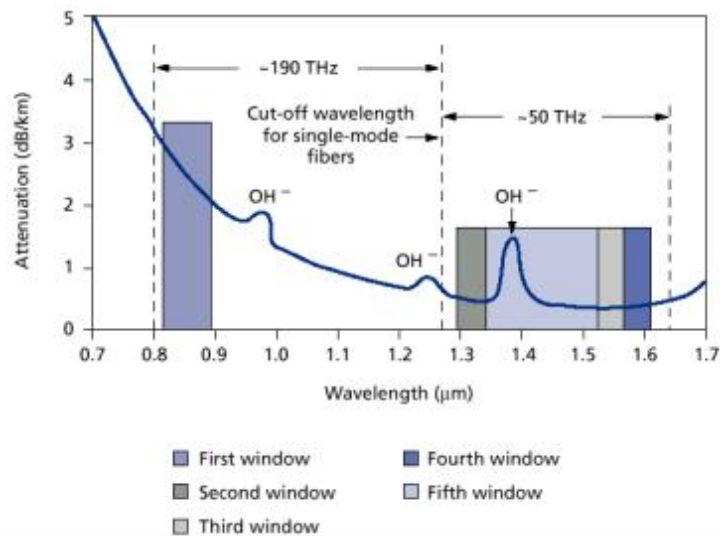


Fig. 1.3 Atenuació en la fibra òptica en funció de la longitud d'ona. Finestres de transmissió

- **Immunitat electromagnètica.** La fibra no irradia i no és sensible a les radiacions electromagnètiques. La fibra és totalment immune a tota classe d'interferències, incloent-hi llampecs, i no condueix l'electricitat. Pot, no obstant, estar en contacte directe amb equips elèctrics de voltatge alt o amb línies elèctriques. Tampoc no crearà bucles de terra de cap classe.
- **Seguretat.** La fibra òptica és més difícil d'intervenir i no radia les senyals que transmet a l'exterior com passa amb el coaxial.
- **Mida i pes.** El material utilitzat en la fibra òptica la fa molt còmoda d'usar. Les fibres òptiques són més primes, més lleugeres i més flexibles que el fil de coure. Això fa que sigui més fàcil de manejar i instal·lar i, a més a més, utilitza menys espai en els conductes.
- Com que la fibra bàsica es fa de vidre, no es corromp i és insensible a la majoria dels productes químics. Pot ser enterrada directament en moltes classes de terra o ser exposada a la majoria de les atmosferes corrosives en plantes químiques (2)

A més a més, cada dia apareixen noves aplicacions com poden ser la descàrrega de dades, el vídeo d'alta definició, els jocs online, la música i els continguts multimèdia, la veu sobre ip, la domòtica, la tele-seguretat, la videoconferència, etc. que requereixen cada cop més ample de banda.

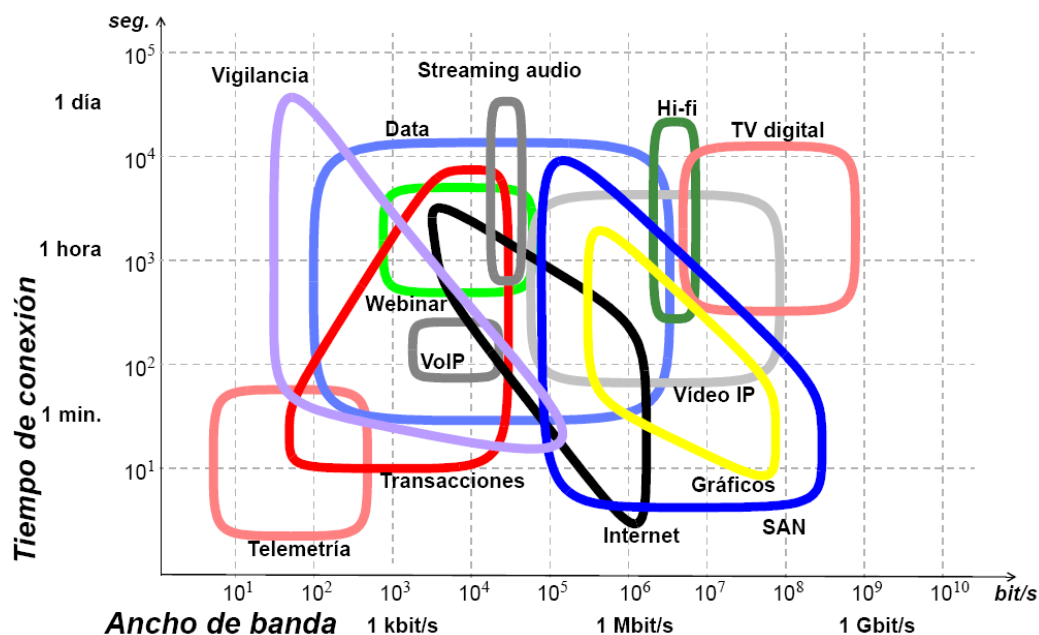


Fig. 1.4 Nous serveis i amples de banda necessaris

Com podem observar en la fig. 1.4 les noves aplicacions que apareixen amb força a la societat de la informació requereixen amples de banda cada cop més grans.

Com ja s'ha comentat, les solucions amb fibra òptica permeten amples de banda molt superiors als oferts per les tecnologies xDSL amb el gran avantatge d'oferir majors distàncies.

Podem concloure doncs, que la fibra òptica ens ofereix un ampla de banda pràcticament il·limitat, de l'ordre dels Terabits/s, insensible a les interferències electromagnètiques, que ens ofereix un medi d'accés universal capaç de satisfer l'ampla de banda demandat actualment, així com el demandat en els propers 30 o 50 anys. (3)

### 1.3. Desenvolupament de la modulació de polarització

La modulació de polarització va ser descrita per primer cop per Niblack i Wolf l'any 1964 (4). Inicialment, la modulació de polarització no va rebre molta atenció a causa del renom de la tècnica de modulació d'intensitat (IM). Va ser a partir dels anys 90 que es va popularitzar. La modulació de polarització ha estat teòricament i experimentalment demostrada per diferents investigadors (5), (6), (7), (8).

L'esquema de modulació de l'estat de polarització PoSK (*Polarization Shift Keying*) presenta una sèrie d'avantatges respecte als formats de modulació de la llum convencionals. Posseeix una alta immunitat al soroll de fase del làser, és insensible a les fluctuacions de la polarització i millora la sensibilitat respecte a altres sistemes de modulacions multinivell. Això es deu a què els sistemes convencionals de modulació com ASK, FSK, PSK i DPSK, els punts que representen els símbols transmesos estan situats en un cercle en l'espai de senyal, en canvi, el sistema de modulació PoSK els símbols estan representats per punts que pertanyen a una superfície esfèrica. Això significa que la distància entre els punts de la constel·lació decreix de forma més lenta quan s'incrementa el número de punts de la constel·lació. Gràcies a aquests avantatges els esquemes de modulació PoSK suposen una alternativa prometedora per a transmissions per fibra òptica a llarga distància (9).

Encara que els avantatges de la modulació de polarització siguin molt atractius, té inconvenients. En primer lloc, el transmissor i el circuit receptor són més complexos que per a una modulació d'intensitat i, a més a més, el cost d'implementació és més alt. Malgrat això, els pros del PoSK compensen els contres (5), (10).

## 1.4. Objectius

L'objectiu principal d'aquest projecte és caracteritzar el modulador de polarització electroòptic fabricat amb tecnologia d'òptica integrada. Concretament, es definiran els paràmetres principals del modulador com són el voltatge de mitja ona i la resposta en freqüència i també s'estudiaran les seves principals aplicacions.

Per assolir aquest objectiu s'ha de caracteritzar el modulador, però abans de poder arribar a la caracterització es necessita entendre com funciona el modulador electroòptic basat en cristalls de Niobat de Liti ( $\text{LiNbO}_3$ ) que, és la base de les guies d'ona que fan possible el modulador; per tant, una part fonamental en la realització del projecte és l'estudi de les propietats dels medis birefringents com és el  $\text{LiNbO}_3$  i de les seves possibles aplicacions en les comunicacions per fibra òptica.

Finalment, una part complementària del projecte és l'estudi i la realització del disseny d'un controlador de polarització manual que ens permeti realitzar els experiments necessaris per a caracteritzar el modulador.

## 1.5. Organització del projecte

El projecte s'organitza en diferents capítols.

El **primer capítol** "Introducció", no es res més que una petita introducció al projecte final de carrera. Es fa una breu presentació de la evolució de les comunicacions òptiques i dels avantatges que aquestes ens ofereixen. També es realitza una concisa explicació del desenvolupament teòric i experimental de la modulació de polarització i es defineixen els objectius del projecte.

En el **segon capítol** "La polarització de la llum" estudiarem els conceptes fonamentals relacionats amb la polarització de la llum. En primer lloc, revisarem el concepte de polarització i els tipus de polarització de la llum que existeixen. En segon lloc, estudiarem diverses maneres de representar matemàticament i gràficament l'estat de polarització de la llum, els vectors i matrius de Jones, els paràmetres de Stokes i les matrius de Muller i l'esfera de Poincaré.

Els paràmetres d'Stokes ens serviran per a representar completament un estat de polarització i l'esfera de Poincaré ens permetrà la descripció gràfica de senyals polaritzades i de la transformació de la polarització provocada per la propagació de la llum a través de diferents dispositius.

Per últim, també estudiarem el grau de polarització de la llum, el concepte de llum natural i de llum parcialment polaritzada.

El **tercer capítol** "Moduladors electroòptics" tractarà d'explicar breument les propietats dels medis òptics tals com la birefringència, l'efecte Pockels i la dispersió per mode de polarització. Així mateix, descriurà les característiques del cristall de Niobat de Liti, el qual permet canviar els seus índexs de refracció mitjançant l'aplicació d'un camp elèctric extern. Aquesta és la base del modulador de polarització que es pretén caracteritzar. A més, es farà una descripció de les diferents tècniques de modulació electroòptica que s'utilitzen per a transmetre la informació per mitja de fibra òptica, donant un especial èmfasi a la modulació de polarització.

En el **capítol quart** "Caracterització del modulador de polarització" es realitzaran i s'analitzaran les mesures dels paràmetres característics del modulador, tals com la resposta en freqüència, la mesura del voltatge de mitja ona per a tot l'ample de banda del modulador i es relacionarà amb la base teòrica dels capítols precedents. A més, es descriuran els diferents mètodes de mesura aplicats per a l'obtenció dels resultats.

En el **cinquè capítol** “Conclusions” es presentaran les aportacions del projecte com a resultat de tot el seu desenvolupament, així com algun suggeriment per a futurs treballs sobre el tema dels moduladors de polarització.



## 2. La polarització de la llum

### 2.1. Introducció

La polarització de la llum és un fenomen que ve determinat per la direcció del vector de camp elèctric  $\vec{E}(\vec{r}, t)$ , on  $\vec{r}$  és la posició i  $t$  el temps. És una propietat de les ones electromagnètiques, que descriu la direcció del camp elèctric transversal.

Segons la teoria electromagnètica de Maxwell, la llum és una ona electromagnètica caracteritzada pels vectors  $\vec{E}$  (intensitat de camp elèctric) i  $\vec{B}$  (intensitat de camp magnètic) que vibren perpendicularment entre sí i al mateix temps en la direcció de propagació de l'energia lluminosa. En òptica ens ocuparem fonamentalment del vector  $\vec{E}$ .

Resolent les equacions de Maxwell es poden trobar les equacions d'ona per al camp elèctric  $\vec{E}$ . Les solucions més senzilles d'aquestes equacions són les ones planes que es poden escriure de la següent manera:

$$\vec{E}(z, t) = \Re\{\vec{E}_0 \cdot e^{j(\omega t - kz)}\} \quad (2.1)$$

on  $\omega$  és la freqüència angular,  $z$  la direcció de propagació i  $k$  el nombre d'ona.

Que la solució sigui una ona plana implica que els components del camp elèctric i el camp magnètic estan continguts en un pla perpendicular a la direcció de propagació. En estar contingudes en un pla, es pot expressar la solució de l'equació d'ona en funció de les coordenades  $x$  i  $y$ . D'aquesta manera s'obté:

$$\vec{E}(z, t) = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} \quad (2.2)$$

on:

$$E_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz) + \varphi_x \quad (2.3)$$

$$E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kz) + \varphi_y \quad (2.4)$$

Les equacions (2.3) i (2.4) són les equacions paramètriques d'una el·lipse, que també es pot expressar de la següent manera:

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \cos \varphi = \sin^2 \varphi \quad (2.5)$$

on  $\varphi = \varphi_y - \varphi_x$  és la diferència de fases entre els components del camp elèctric.

Aquesta el·lipse és anomenada corba de polarització. La corba de polarització es caracteritza pel desfasament  $\varphi$  i per les amplituds de les components del camp elèctric  $E_{0x}$  i  $E_{0y}$ . Segons el desfasament i l'amplitud d'aquests components tindrem diferents tipus de polarització de la llum.

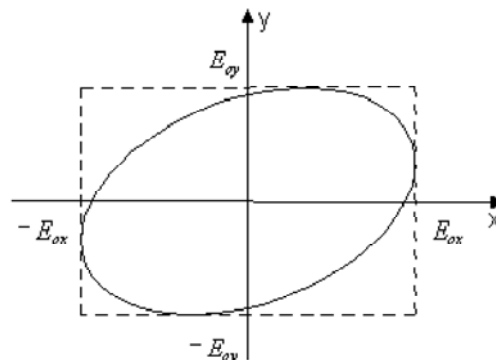


Fig. 2.1 El·lipse de polarització

## 2.2. Tipus de polaritzacions

A continuació s'expliquen els diferents tipus de polarització en funció dels valors d'amplitud dels components del camp elèctric i del desfasament entre elles.

### 2.2.1. Polarització lineal

La polarització lineal es caracteritza per tenir el camp elèctric apuntant sempre a una direcció fixa. Els casos més notables d'aquest tipus de polarització el tenim quan un dels dos components del camp elèctric és nul, tot obtenint el camp elèctric amb una polarització horitzontal o vertical.

Obtindrem una polarització lineal sempre que tinguem un desfasament  $\varphi = 0$  o  $\pi$ .

Si apliquem aquesta condició a l'equació de l'el·lipse s'obté l'equació explícita d'una recta. (11)

$$\begin{aligned} \frac{E_x^2}{E_{ox}^2} + \frac{E_y^2}{E_{oy}^2} \pm 2 \frac{E_x E_y}{E_{ox} E_{oy}} &= 0 \\ \Rightarrow \left( \frac{E_x}{E_{ox}} \pm \frac{E_y}{E_{oy}} \right) &= 0 \end{aligned} \tag{2.6}$$

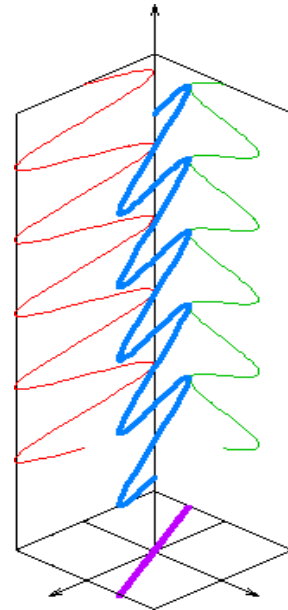


Fig. 2.2 Polarització lineal (12)

### 2.2.2. Polarització circular

En aquets cas, el camp elèctric  $\vec{E}$  descriu una figura circular. Les condicions que s'han de complir per obtenir una polarització circular són dos. En primer lloc, els dos components del camp elèctric han de tenir la mateixa amplitud. En segon lloc, els dos components han d'estar en quadratura de fase. Per tant, tenim:

$$E_{ox} = E_{oy} = E_o \text{ i } \varphi = \pm \pi/2$$

Si apliquem aquesta condició a l'equació de l'el·lipse s'obté l'equació explícita d'una circumferència (11):

$$\frac{E_x^2}{E_o^2} + \frac{E_y^2}{E_o^2} = 1 \tag{2.7}$$

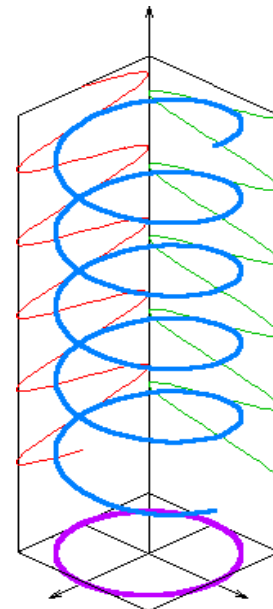


Fig. 2.3 Polarització circular (12)

### 2.2.3. Polarització el·líptica

La polarització el·líptica és el cas més general. Tindrem un camp elèctric polaritzat el·lípticament quan no es compleixin les condicions dels casos anterior. És a dir:

$$E_{ox} \neq E_{oy} \text{ i } \varphi \neq 0, \pm\pi/2, \pi$$

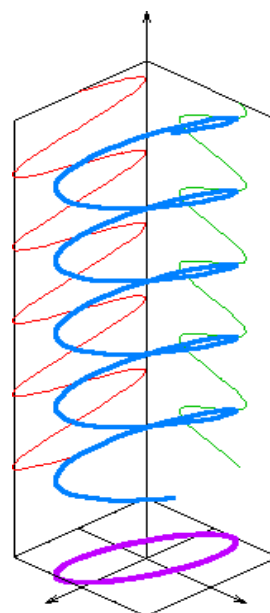


Fig. 2.4 Polarització el·líptica (12)

És important definir el sentit de gir del camp elèctric. Tant per a la polarització el·líptica com per a la circular el sentit de gir pot ser a esquerres o a dretes depenen de si el desfasament és negatiu o positiu. Per conveni es considera que el sentit de gir a esquerres és quan el desfasament és negatiu i el sentit de gir a dretes quan és positiu.



Fig. 2.5 Polarització circular a esquerres

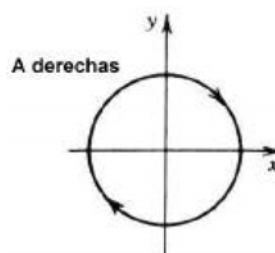


Fig. 2.6 Polarització circular a dretes

## 2.3. Vectors i matrius de Jones

Existeixen diverses tècniques per al tractament i **representació del SOP** (estat de polarització) de la llum. Per descriure la polarització podem utilitzar els **vectors de Jones**, els **paràmetres de Stokes** o l'**esfera de Poincaré**.

De l'apartat anterior, sabem que una ona plana monocromàtica que viatja en direcció z es pot caracteritzar per les components del camp elèctric en l'eix x i l'eix y. Si escrivim aquests components en un vector columna tenim el vector de Jones.

$$\vec{J} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \tag{2.8}$$

Aquest vector conté tota la informació necessària per a identificar el SOP de la llum. Per tant, podem extreure la forma de l'el·lipse de polarització i determinar el sentit de gir. També el podem utilitzar per a determinar la intensitat total de l'ona  $I = E_{ox}^2 + E_{oy}^2$ .

Per a facilitar el tractament matemàtic, es fa necessària la separació de la informació del SOP i l'amplitud real del camp elèctric. Per això, en moltes ocasions es defineix el vector de Jones normalitzat a irradiància unitat. (13)

Per tal d'entendre millor els vectors de Jones, es mostren a la taula següent una sèrie d'exemples dels estats de polarització més habituals.(13)

Estat de polarització	$E_{ox}, E_{oy}, \varphi$	Vector de Jones
$P_0$	$E_{ox} = 1$ $E_{oy} = 0$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
$P_{90}$	$E_{ox} = 0$ $E_{oy} = 1$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
$P_{\pm 45}$	$E_{ox} = E_{oy} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ $\varphi = 0, \pi$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \pm 1 \end{pmatrix}$
$R,L$	$E_{ox} = E_{oy} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \pm j \end{pmatrix}$

Taula 2.1 Exemples de SOPs expressats amb vectors de Jones

Evidentment, l'estat de polarització no és quelcom fix i invariable, tot al contrari, el SOP es pot modificar o transformar en un altre SOP. De fet, el pas del feix de llum a través d'un mitjà qualsevol, en general, provoca un canvi de SOP.

Tots aquests canvis de SOP es poden caracteritzar mitjançant una matriu quadrada de 4 elements. Aquesta matriu transforma un vector de dos elements en un altre de dos elements. La matriu que transforma un SOP, representat per un vector de Jones, en un altre SOP, representat per un altre vector de Jones, s'anomena **matriu de Jones**.

La fig. 2.7 ens mostra d'una forma esquemàtica com es modifica el SOP en passar a través d'un medi.

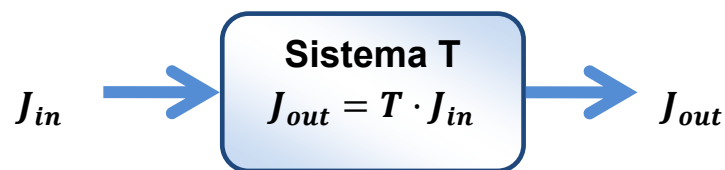


Fig. 2.7 Modificació del SOP en passar a través d'un medi

Existeixen diversos dispositius utilitzats per a modificar el SOP d'un senyal òptic donat. Les matrius de Jones d'aquests dispositius seran matrius 2x2, que representen els efectes que provoquen sobre la llum que incideix en ells.

La taula següent mostra diferents exemples de matrius de Jones de diversos dispositius utilitzats per a modificar el SOP de la llum.(13)

Dispositiu	Matriu de Jones
<b>Polaritzador lineal amb eix de transmissió formant un angle <math>\alpha</math> amb l'horitzontal</b>	$A = \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{pmatrix}$
<b>Polaritzador horitzontal (<math>\alpha = 0</math>)</b>	$A(P_0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$
<b>Polaritzador vertical (<math>\alpha = 90</math>)</b>	$A(P_{90}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
<b>Polaritzador a <math>45^\circ</math> (<math>\alpha = \pm 45</math>)</b>	$A(P_{\pm 45}) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \pm 1 \\ \pm 1 & 1 \end{pmatrix}$
<b>Retardador de <math>\varphi</math></b>	$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi} \end{pmatrix}$
<b>Rotador de polarització:</b>	$A = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$

Dispositiu	Matriu de Jones
<b>Polaritzador circular a esquerres i a dretes</b>	$A = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -i \\ +i & 1 \end{pmatrix}$ $A = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{pmatrix}$
<b>Half-wave plate (HWP)</b>	$A = \begin{pmatrix} -i & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}$
<b>Quarter-wave plate (QWP)</b>	$A = e^{i\pi/4} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}$

Taula 2.2 Exemples de dispositius que modifiquen el SOP expressats amb matrius de Jones

Si posem en cascada diferents sistemes òptics podem calcular la polarització final fent el producte de les matrius de Jones dels diferents dispositius (dispositiu equivalent) i multiplicar-ho pel vector de polarització de la llum incident inicial. (Veure fig. 2.8).

L'expressió matemàtica del sistema mostrat a la fig. 2.8 queda de la següent manera (11):

$$J_{out} = [T_2] \cdot [T_1] \cdot J_{in} \tag{2.9}$$

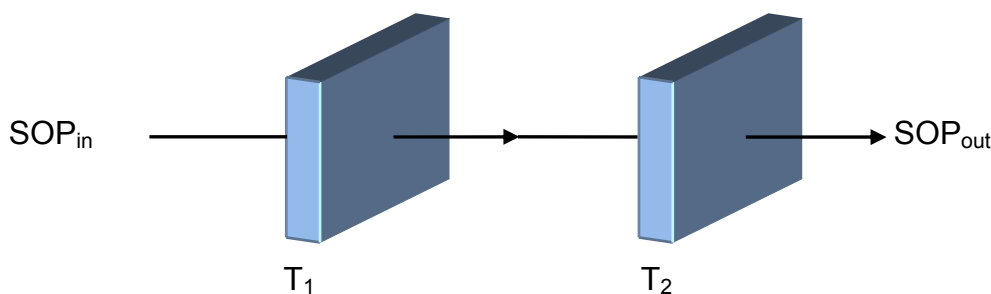


Fig. 2.8 Concatenació de dispositius òptics travessats per un feix de llum polaritzat

## 2.4. Llum natural, llum parcialment polaritzada i grau de polarització

En la llum natural la diferència de fase entre les components del camp elèctric varien en funció del temps i el terme mitjà de les amplituds de  $E_{ox}$  i el terme mitjà de les amplituds de  $E_{oy}$  són iguals, per tant en la llum natural tots els estats de polarització són possibles en el temps. És a dir, la llum natural està

constituïda per dues ones amb els seus vectors elèctrics ortogonals que en mitjana tindran el mateix valor i que la diferència de fase entre ells varia en funció del temps.

Els quadres següents representen d'una manera esquemàtica les diferències entre la llum natural i la llum polaritzada.

<p><b>Llum natural</b></p> $E_o \quad E_o \quad \varphi(t)$ $I_N = E_o^2 + E_o^2 = 2E_o^2$	<p><b>Llum polaritzada</b></p> $E_{ox} \quad E_{oy} \quad \varphi$ $I_P = E_{ox}^2 + E_{oy}^2$
--	--

Entre la llum natural i la llum totalment polaritzada existeixen, lògicament, graus intermedis, és a dir, existeix **llum parcialment polaritzada**. Aquesta pot visualitzar-se com la suma d'una llum totalment polaritzada i una llum natural. Depenent de la proporció d'aquesta barreja, la llum resultant tindrà un **grau de polarització (DOP)** major o menor. El grau de polarització es defineix com:

$$DOP = \frac{I_P}{I_P + I_N} \tag{2.10}$$

essent  $I_P$  la intensitat de llum polaritzada i  $I_N$  la intensitat de llum natural.

Noti que  $0 \leq DOP < 1$ . En general, els elements que produeixen llum polaritzada, el que generen en realitat, és llum parcialment polaritzada amb un grau més o menys alt de polarització, la llum totalment polaritzada,  $DOP = 1$ , és una idealització.

En les llums totalment polaritzades la intensitat de la llum natural és nul·la  $I_N = 0$ . El grau de polarització d'una llum natural és, doncs,  $DOP = 0$ .



Fig. 2.9 Llum polaritzada

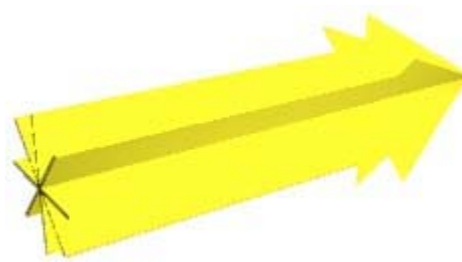


Fig. 2.10 Llum natural



## 2.5. Paràmetres d'Stokes i matrius de Muller

Anem a veure ara una altra representació que ens permeti definir tant la llum totalment polaritzada com la parcialment polaritzada.

Els vectors de Jones són únicament aplicables a llum que està totalment polaritzada. Si la llum és no polaritzada o parcialment polaritzada hem d'utilitzar els paràmetres de Stokes i les matrius de Muller.

Els paràmetres de Stokes vénen definits per les següents expressions:

$$S_0 = I_P + I_N = E_{ox}^2 + E_{oy}^2 + 2E_o^2 \quad (2.11)$$

$$S_1 = E_{ox}^2 - E_{oy}^2 \quad (2.12)$$

$$S_2 = 2E_{ox}E_{oy} \cos \varphi \quad (2.13)$$

$$S_3 = 2E_{ox}E_{oy} \sin \varphi \quad (2.14)$$

El paràmetre  $S_0$  representa la densitat de potència electromagnètica total o irradiància de la llum incident. (15)

Els paràmetres de Stokes tenen les mateixes expressions tant per a la llum totalment polaritzada com per a la llum parcialment polaritzada. L'única diferència rau en que la irradiància augmenta en un factor  $2E_o^2$  si tenim llum natural.

Els paràmetres de Stokes en forma de vector si considerem irradiància unitat ( $S_0 = 1$ ) quedaran de la següent manera:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} 1 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

La taula següent conté una sèrie d'exemples dels SOPs més comuns expressats en funció dels seus paràmetres de Stokes considerant irradiància unitat.

Estat de polarització	$E_{ox}, E_{oy}, \varphi$	Vector de Stokes
$P_0$	$E_{ox} = 1$ $E_{oy} = 0$	$P_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$
$P_{90}$	$E_{ox} = 0$ $E_{oy} = 1$	$P_{90} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$
$P_{\pm 45}$	$E_{ox} = E_{oy} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ $\varphi = 0, \pi$	$P_{45} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \pm 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
$R,L$	$E_{ox} = E_{oy} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$	$P_{R,L} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{pmatrix}$
Llum no polaritzada	$E_o = 1$ $\varphi(t)$	$P_{UN} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$

Taula 2.3 Exemples de SOPs expressats amb vectors de Stokes

Com hem vist en l'apartat anterior, la llum parcialment polaritzada és la suma de llum polaritzada i llum natural. També hem calculat el grau de polarització segons la quantitat de llum polaritzada i la quantitat de llum natural. Veure equació (2.10).

Ara podem definir el grau de polarització mitjançant els paràmetres de Stokes.

$$DOP = \frac{I_P}{I_P + I_N} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0^2} \quad (2.16)$$

Quan hem estudiat els vectors de Stokes hem caracteritzat els diferents estats de polarització mitjançant vectors 4x1. Sabent que a un element polaritzant li arriba un determinat estat de polarització caracteritzat per un vector de Stokes de 4x1 i que d'ell surt un altre estat caracteritzat també per un vector de Stokes de 4x1, podem deduir que l'element polaritzant ha de ser una matriu 4x4. Aquestes matrius s'anomenen **matrius de Muller**.

La taula següent mostra diferents exemples de matrius de Muller de diversos dispositius utilitzats per a modificar el SOP de la llum.

Dispositiu	Matriu de Muller
<b>Polaritzador lineal amb el seu eix de transmissió formant un angle <math>\alpha</math> amb l'horitzontal.</b>	$M = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
<b>Polaritzador horitzontal</b>	$M = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
<b>Polaritzador vertical</b>	$M = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
<b>Polaritzador a <math>+45^\circ</math></b>	$M = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
<b>Polaritzador a <math>-45^\circ</math></b>	$M = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

Taula 2.4 Exemples de dispositius que modifiquen el SOP expressats amb matrius de Muller

Si posem en cascada diferents sistemes òptics podem calcular la polarització final fent el producte de les matrius de Muller dels diferents dispositius i multiplicar-ho pel vector de Stokes de la polarització de la llum incident inicial, de la mateixa manera que ho fem amb les matrius de Jones. (Veure fig. 2.8).

## 2.6. L'esfera de Poincaré

L'esfera de Poincaré és una eina gràfica en l'espai real tridimensional que permet la descripció de senyals polaritzats i la descripció de la transformació de la polarització provocada per la propagació a través dels dispositius. Es tracta d'un artifici geomètric molt útil per a comprendre les transformacions que sofreix l'ona lluminosa en travessar dispositius capaços d'alterar el seu SOP.

Un estat de polarització es representa únicament amb un punt en l'esfera de Poincaré. L'equador de l'esfera conté totes les polaritzacions lineals, mentre que els pols de l'esfera representen els dos estats de polarització circulars.

Qualsevol altre punt entre l'equador i els pols representa un estat de polarització el·líptic.

Una característica fonamental de l'esfera de Poincaré és que els estats de polarització ortogonals cauen en punts oposats respecte al centre de l'esfera.

El SOP d'una llum qualsevol, per exemple el·líptica, queda representat pel punt C sobre l'esfera de Poincaré. La circumferència paral·lela a l'equador que passa per C, conté tots els estats de polarització que la seva el·lipticitat  $\varphi$  sigui igual a la de la llum representada per C. D'altra banda, la semicircumferència perpendicular a l'equador i que passa per C conté els estats d'igual inclinació  $\alpha$ .

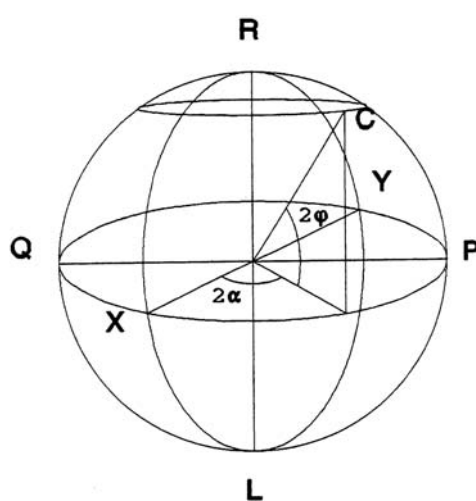


Fig. 2.11 Representació de l'Esfera de Poincaré

Com s'indica a la fig. 2.11, la longitud representa el doble de la inclinació  $\alpha$  de la llum representada. Per la seva banda, la latitud es correspon amb el doble de la el·lipticitat  $\varphi$  d'aquesta llum.

La **inclinació** és l'angle entre l'eix major de l'el·lipse de polarització i l'eix horitzontal, o sigui, l'eix x. A aquest angle el denominarem  $\alpha$ . En canvi, la **el·lipticitat** és la relació entre l'eix major i l'eix menor de l'el·lipse de polarització. Aquest paràmetre s'expressarà com l'angle  $\varphi$ . La inclinació i la el·lipticitat determinen completament l'estat de polarització o SOP, que expressa les característiques del tipus de polarització del camp elèctric. (11)

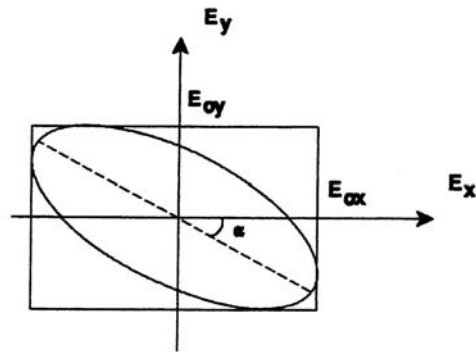


Fig. 2.12 El·lipse de polarització

Alguns dels punts característics, indicats a l'esfera de Poincaré de la fig. 2.11, juntament amb les polaritzacions que representen, són els següents:

<b>R</b>	Polarització circular a dretes.
<b>L</b>	Polarització circular a esquerres.
<b>X</b>	Polarització lineal horitzontal.
<b>I</b>	Polarització lineal vertical.
<b>P</b>	Polarització lineal amb inclinació $+45^\circ$ .
<b>Q</b>	Polarització lineal amb inclinació $-45^\circ$ .

Taula 2.5 Relació entre els punts característics de l'esfera de Poincaré i la seva polarització

Ara podem relacionar els paràmetres d'Stokes amb l'esfera de Poincaré.

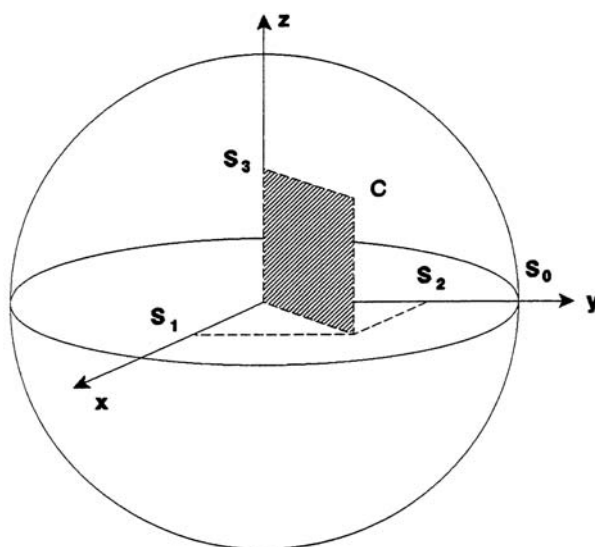


Fig. 2.13 Relació dels paràmetres de Stokes amb l'esfera de Poincaré

Observem a la fig. 2.13 que  $S_1$ ,  $S_2$  i  $S_3$ , no són més que les projeccions d'un SOP concret sobre els tres eixos d'una esfera de Poincaré de radi  $S_0$ .

## 3. Moduladors electroòptics

### 3.1. Introducció

La generació de senyals en termes dels sistemes de transmissió òptics pot entendre's com la modulació d'una font làser amb un senyal elèctric binari. D'acord amb això, podem parlar de la modulació del senyal òptic i dels formats de modulació.

El camp elèctric complex d'una font làser utilitzada típicament, en comunicacions òptiques, està representada per:

$$\vec{E} = \vec{A}(t)\vec{e}(t)\cos\{wt + \varphi(t)\} \quad (3.1)$$

on  $\vec{A}(t)$  és l'amplitud del camp òptic,  $w$  és la freqüència angular òptica,  $\varphi$  és la fase òptica i  $\vec{e}$  representa el vector de polarització de la font làser, també anomenat vector de Jones. Aquests quatre paràmetres representen els quatre graus de llibertat que poden ser explotats per a generar modulacions de senyal òptic. Cada un d'aquest paràmetres pot ser modulats per un senyal elèctric i binari en banda base.

Depenent de quin paràmetre de la font làser es moduli, la modulació s'anomenarà: *Amplitude Shift Keying* (ASK), *Frequency Shift Keying* (FSK), *Phase Shift Keying* (PSK) o *Polarization Shift Keying* (PoSK). (16)

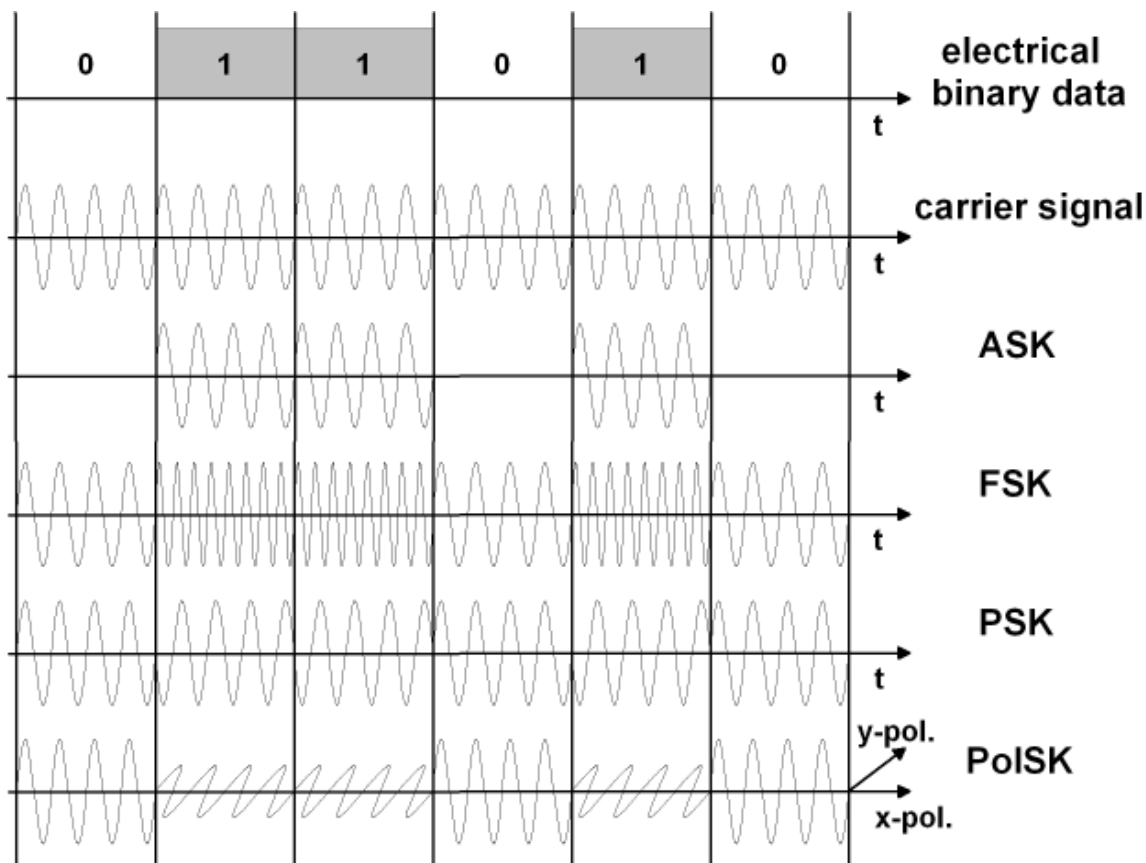


Fig. 3.1 Principis de modulació de senyals òptics

## 3.2. Propietats dels medis òptics

### 3.2.1. L'efecte Pockels

L'índex de refracció d'un material electroòptic depèn del camp elèctric aplicat, segons una funció  $n(E)$ , que varia molt poc amb el camp, pel que pot desenvolupar-se en sèrie de Taylor al voltant d'un valor d'  $E = 0$

$$n(E) = n + a_1 E + \frac{1}{2} a_2 E^2 + \dots \quad (3.2)$$

on els coeficients que apareixen són:

$$n = n(0) \quad a_1 = \left( \frac{dn}{dE} \right)_{E=0} \quad a_2 = \left( \frac{d^2n}{dE^2} \right)_{E=0} \quad (3.3)$$

Introduint dos nous coeficients  $r$  i  $s$ , anomenats coeficients electroòptics:



$$r = -\frac{2a_1}{n^3} \qquad s = -\frac{a_2}{n^3} \qquad (3.4)$$

L'equació queda de la forma:

$$n(E) = n - \frac{1}{2}rn^3E - \frac{1}{2}sn^3E^2 + \dots \qquad (3.5)$$

Ens fixarem especialment en el segon terme de l'equació (3.5), que ens dóna l'expressió matemàtica de l'anomenat efecte electroòptic lineal o efecte Pockels resultant de menysprear el tercer terme enfront del segon, pel que queda:

$$n(E) \approx n - \frac{1}{2}rn^3E \qquad (3.6)$$

que és una funció lineal amb el camp aplicat (fig. 3.2). Expressant ara la variació de l'índex de refracció:

$$\Delta n = n(E) - n \approx -\frac{1}{2}rn^3E \qquad (3.7)$$

El material que compleix aquestes especificacions es coneix com un medi o cel·la Pockels.

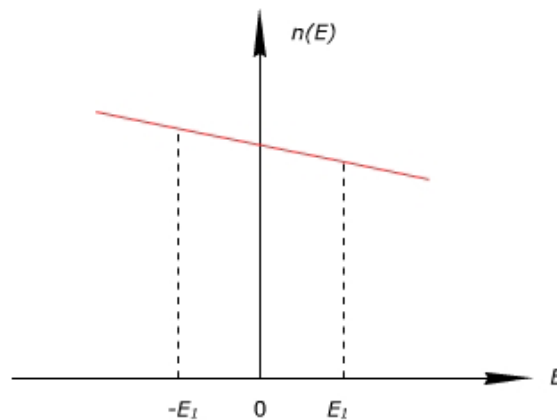


Fig. 3.2 Variació lineal de l'índex de refracció d'un material cristal·lí a causa de l'efecte Pockels.

L'equació (3.6) depèn no solament dels valors del camp i de l'índex de refracció, sinó també d'un coeficient  $r$  denominat **coeficient Pockels** o coeficient electroòptic lineal, donat en  $m/V$ . Aquest coeficient no és únic per a un cristall: n'existeixen varis i són els components d'una matriu que relaciona els increments de l'índex de refracció amb el camp elèctric aplicat, i depenen

de les diferents disposicions cristal·lines dels materials. Existeixen unes taules que indiquen aquests coeficients pels diferents tipus de cristalls.

Els materials més àmpliament utilitzats per a la producció de cèl·lules Pockels són:  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$ , KDP ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), ADP ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ), GaAs, InAs, CdTe, BSO ( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ).

A la pràctica, el canvi lineal de l'índex de refracció obtingut a temperatura ambient amb camps elèctrics de l'ordre dels  $20 \text{ kV/cm}$ , és únicament de  $10^{-4}$ . Aquest valor és molt petit, encara que és suficient en aplicacions reals, per a produir retards de l'ordre de la longitud d'ona, tot aconseguint fenòmens d'interferència que són utilitzats, per exemple, per a modular la fase i la intensitat de la llum. (17)

### 3.2.2. La birefringència

En la majoria dels materials la velocitat de la llum és la mateixa en totes les direccions. Quan és així, els materials s'anomenen isòtrops. A causa de la seva estructura atòmica, els materials birefringents són anisòtrops. La velocitat de la llum depèn de la seva direcció de propagació a través del material. Quan un raig de llum està incidint sobre aquests materials pot separar-se en dos raigs linealment polaritzats perpendiculars entre sí que es propaguen a diferents velocitats (Veure fig. 3.3).

Per tant, s'entén per **birefringència** o doble refracció, la propietat de certs materials de desdoblar un raig de llum incident en dos raigs linealment polaritzats perpendiculars entre sí. El primer raig segueix les lleis normals de la refracció i és anomenat raig ordinari. L'altre té una velocitat de propagació i un índex de refracció diferent i s'anomena raig extraordinari.

La birefringència d'un material és caracteritzada per la diferència,  $\Delta n$ , dels índexs de refracció del raig ordinari i de l'extraordinari. Aquesta la podem expressar de la següent manera:

$$\Delta n = n_e - n_o \quad (3.8)$$

La longitud del cristall és un altre paràmetre important perquè el desfasament s'acumula mentre la llum es propaga a través del material birefringent. La diferència en els camins òptics conduirà a un canvi de l'estat de polarització de l'ona mentre avança a través del medi. Qualsevol estat de polarització es pot produir amb la combinació correcta dels paràmetres de birefringència i longitud del cristall (17), (18).

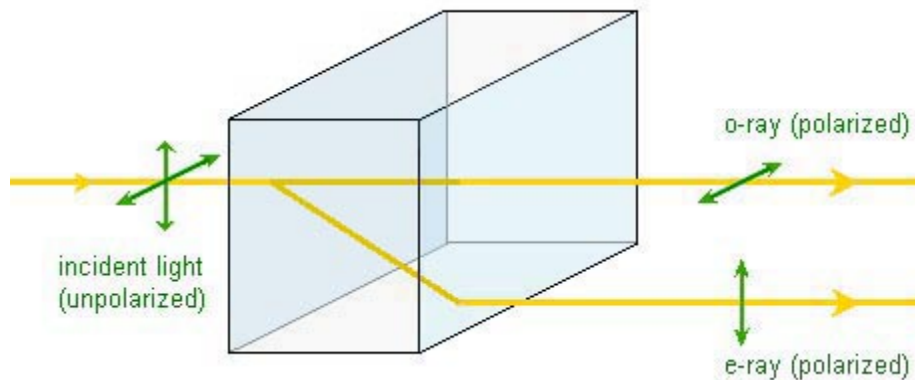


Fig. 3.3 La llum que viatja a través d'un medi birefringent prendrà un dels dos camins en funció de la seva polarització.

### 3.2.3. Polarization Mode Dispersion (PMD)

La dispersió del mode de polarització (PMD: *Polarization Mode Dispersion*) és una forma de dispersió material que pren importància en el sector de les telecomunicacions en aplicacions d'alta velocitat i ample de banda gran. Es produeix a causa de les asimetries al llarg de la fibra òptica, que localment produeix l'efecte de la birefringència (l'índex de refracció depèn de la polarització).

La birefringència en l'entorn de la fibra òptica és un fenomen que sorgeix com a conseqüència de l'alteració de la naturalesa circular del nucli de la fibra. Aquesta alteració trencarà amb la ideal isotropia del nucli de la fibra i provocarà canvis perceptibles en l'índex de refracció del nucli. Això provoca que un dels modes de polarització ortogonals viatgi més ràpidament que l'altre, causant dispersió del pols òptic.

La birefringència pot causar el canvi de l'estat de polarització (SOP) de la llum mentre viatja a través de la fibra com es pot observar a la fig. 3.4.

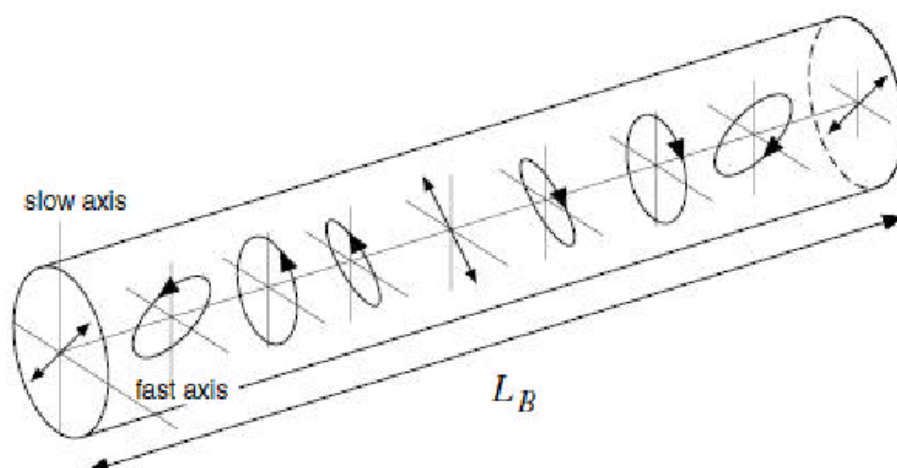


Fig. 3.4 La birefringència de les fibres òptiques canvien el SOP de la llum

La fig. 3.4 mostra un cas especial d'una ona de llum polaritzada linealment a  $45^\circ$  entre els eixos de birefringència (els eixos ràpid i lent), per la qual cosa ambdós eixos són excitats per igual. El retard de fase entre els dos camps ortogonals a causa de la birefringència causa que la polarització evolucioni de forma periòdica, essent el període d'aquesta variació denominat *beat length* ( $L_B = \lambda/\Delta n$ ) (19).

### 3.3. El Niobat de Liti

Els moduladors electroòptics usualment es fabriquen amb cristalls electroòptics, habitualment de Niobat de Liti ( $\text{LiNbO}_3$ ). Aquest material té un coeficient electroòptic que permet crear moduladors de resposta ràpida.

El **Niobat de Liti** és un material **anisòtrop**: això significa que els índexs de refracció depenen de la direcció dels eixos del cristall. Els índexs de refracció del  $\text{LiNbO}_3$  es troben associats amb els eixos de la següent manera: l'eix x correspon a  $n_x = n_o$ , l'eix y a  $n_y = n_o$  i l'eix z a  $n_z = n_e$ .

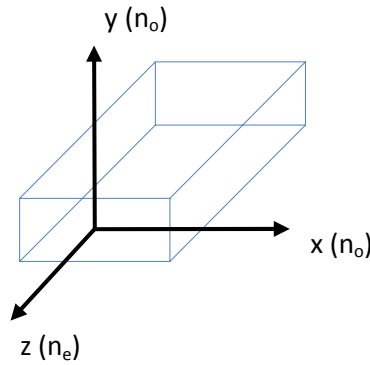


Fig. 3.5 Orientació dels eixos i els índex de refracció d'un cristall de  $\text{LiNbO}_3$

El Niobat de Liti és un cristall fortament anisòtrop el qual pot variar la fase o l'estat de polarització de la llum que el travessa, amb la variació d'un camp elèctric  $\vec{E}$  aplicat externament. Aquesta variació està subjecta a un efecte electroòptic, que es pot explicar de la manera següent. Un camp elèctric extern aplicat al cristall canvia els índexs de refracció  $n_e$  i  $n_o$  segons l'orientació del cristall i del camp aplicat. El cristall actua com una cel·la Pockels.

Si assumim que el camp elèctric aplicat és  $\vec{E} = (0, 0, E)$  els índexs de refracció corresponents als eixos ordinari i extraordinari són els següents (veure apartat 3.2.1. l'efecte pockels, equació (3.6)).

$$n_o(E) \approx n_o - \frac{1}{2} r_{13} n_o^3 E \quad (3.9)$$

$$n_e(E) \approx n_e - \frac{1}{2} r_{33} n_e^3 E \quad (3.10)$$

I la variació induïda pel camp elèctric és de la forma:

$$\Delta n_o(E) \approx -\frac{1}{2} r_{13} n_o^3 E \quad (3.11)$$

$$\Delta n_e(E) \approx -\frac{1}{2} r_{33} n_e^3 E \quad (3.12)$$

Com s'ha explicat en l'apartat 3.2, els materials anisòtrops es caracteritzen per induir birefringència al cristall quan s'aplica un camp elèctric en ell. La birefringència induïda farà que la llum incident es desdobli en dos raigs orientats segons els eixos ordinari (eix x o eix y) i extraordinari (eix z). Aquests raigs tenen un índex de refracció que varia segons el camp elèctric aplicat, com indiquen les equacions (3.9) i (3.10). Per tant, la velocitat de propagació dels

eixos ordinari i extraordinari variaran segons quin camp elèctric apliquem al cristall. (20), (21)

Els moduladors electroòptics es fabriquen com a dispositius integrats amb tecnologia planar, és a dir, mitjançant guies d'ona òptiques, fabricades típicament amb materials electroòptics de  $\text{LiNbO}_3$ . Per tant, a la pràctica, la variació dels índexs de refracció del material òptic s'aconsegueix aplicant una diferència de potencial a la guia d'ona per mitjà de dues plaques paral·leles.

Els moduladors poden tenir dues estructures diferents segon la geometria o el tall del cristall.

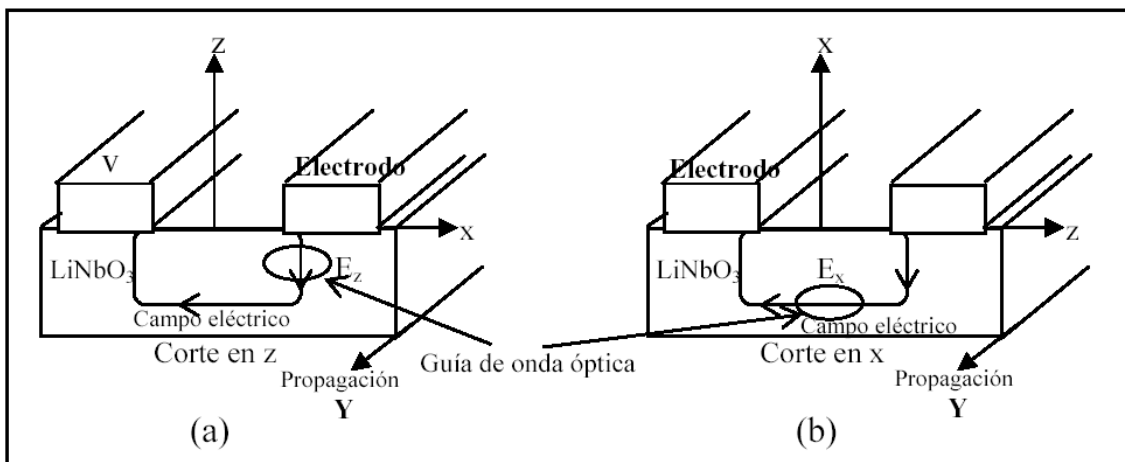


Fig. 3.6 Geometria típica dels moduladors electroòptics de  $\text{LiNbO}_3$ . (a) tall en 'z' i propagació en 'y', (b) tall en 'x' propagació en 'y'. (22)

L'eficiència del modulador dependrà del tipus de geometria del modulador.

Totes aquestes característiques del Niobat de Liti fan que aquest tipus de cristall sigui molt útil per a fabricar moduladors electroòptics. En l'apartat següent, s'expliquen diferents tècniques de modulació que utilitzen aquest tipus de cristall per a modular la informació i transmetre-la a través de fibra òptica.

## 3.4. Tipus de modulacions electroòptiques

### 3.4.1. Modulació de fase (PSK)

La modulació de fase òptica és una modulació externa la qual modula directament l'ona lluminosa, assolint altes freqüències de transmissió. Aquesta utilitza dues fases separades  $180^\circ$ . Per exemple, pot modular el bit '1' amb

l'ona portadora i el bit '0' amb l'ona portadora desfasada 180°. A causa d'això, el senyal modulad en fase quedaria de la següent manera:

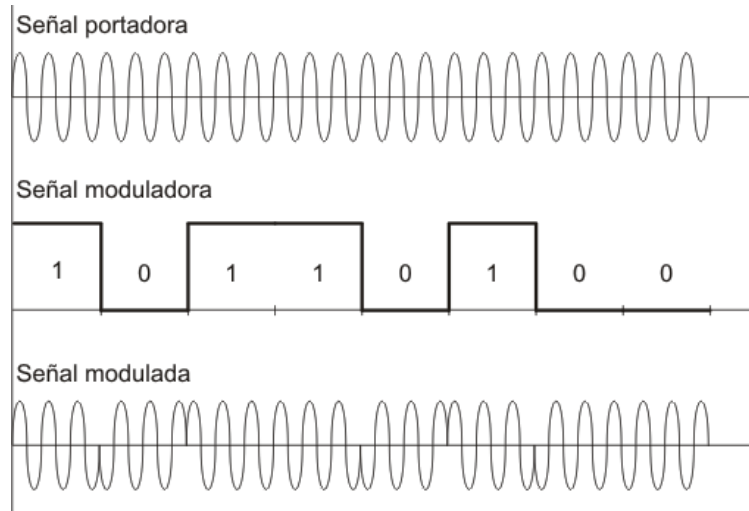


Fig. 3.7 Senyal modulad en fase (23)

Els moduladors, habitualment estan fabricats amb guies d'ona de Niobat de Liti.

Els moduladors de fase òptics són dispositius capaços de modificar el seu índex de refracció mitjançant l'aplicació d'un voltatge  $V(t)$  als elèctrodes posicionats a damunt del cristall de Niobat de Liti.

En general són cel·les Pockels sobre les quals s'aplica un camp elèctric  $\vec{E}$ . L'efecte Pockels, explicat en l'apartat 3.2.1 diu que la birefringència induïda en certs materials cristal·lins és linealment proporcional a la intensitat del camp elèctric aplicat.

A l'equació (3.6) podíem observar el canvi en l'índex de refracció del material quan aplicàvem un camp elèctric. Com que la transmissió del feix al llarg del material és lineal, l'efecte que provoca la variació de l'índex de refracció és la variació en la velocitat de l'ona, el qual equival a modificar la seva fase, segons l'equació:

$$\varphi = n(E)k_0L = \frac{2\pi}{\lambda_0}n(E)L = \varphi_0 - \pi \frac{rn^3EL}{\lambda_0} \quad (3.13)$$

Per tant, el canvi de fase es pot expressar de la següent manera:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta n(E)L \quad (3.14)$$

On  $\Delta n$  és la variació del coeficient de refracció a causa del camp extern aplicat.

$$\Delta n \approx -\frac{1}{2}rn^3E \tag{3.7}$$

A la pràctica, el camp elèctric s'obté aplicant una diferència de potencial entre dues plaques paral·leles.

Ens queda doncs, la següent expressió:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi n^3 r \Gamma}{\lambda d} LV(t) \tag{3.15}$$

On  $n$  és l'índex de refracció,  $r$  és el coeficient electroòptic del  $\text{LiNbO}_3$  en la direcció 'z' o 'x',  $d$  és la separació entre els elèctrodes,  $\Gamma$  és el coeficient de recobriment entre el camp elèctric i el camp òptic i  $V(t)$  és el voltatge aplicat que representa el senyal d'informació. (24)

L'equació (3.15) representa el canvi de fase en funció del voltatge aplicat al modulador.

Podem expressar el canvi de fase de la següent manera:

$$\Delta\varphi = \pi \frac{V(t)}{V_\pi} \quad \text{on} \quad V_\pi = \frac{d \lambda_0}{L r n^3 \Gamma} \tag{3.16}$$

$V_\pi$  és un paràmetre conegut com a **voltatge de mitja ona**, i és el voltatge aplicat al qual la fase canvia en  $\pi$ .

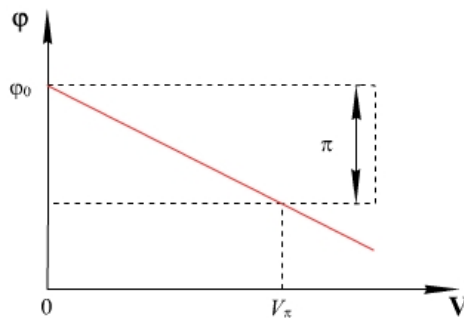


Fig. 3.8 Variació de la fase en funció del voltatge aplicat a una cel·la Pockels

Observem a la fig. 3.8 que el canvi de fase en funció del voltatge aplicat és una relació lineal.

$V_\pi$  és un paràmetre important del modulador de fase. El valor de  $V_\pi$  serà diferent segons quin sigui el tall del cristall i el mode de propagació de l'ona lluminosa.



Per al tall en z i propagació en y tenim que:

$$V_{\pi} = \frac{\lambda d}{n_e^3 r_{33} \Gamma_{\text{TM}} L} \quad (3.17)$$

I per al tall en x i propagació en y:

$$V_{\pi} = \frac{\lambda d}{n_o^3 r_{13} \Gamma_{\text{TE}} L} \quad (3.18)$$

### 3.4.2. Modulació d'amplitud (ASK)

La modulació per desplaçament d'amplitud, en anglès *Amplitude-Shift Keying*, és una forma de modulació en la qual es representen les dades digitals com a variacions d'amplitud de l'ona portadora. L'amplitud d'un senyal portador varia conforme un flux de bits, que modula el senyal, mantenint la freqüència i la fase constant.

El nivell d'amplitud pot ser usat per a representar els valors binaris 0s i 1s. Podem pensar en el senyal portador com un interruptor ON/OFF. En el senyal modulad, el valor lògic '0' és representat per l'absència d'una portadora, mentre que el valor lògic '1' és representat per la portadora. Aquest tipus de modulació també s'anomena *On-Off Keying* (OOK).

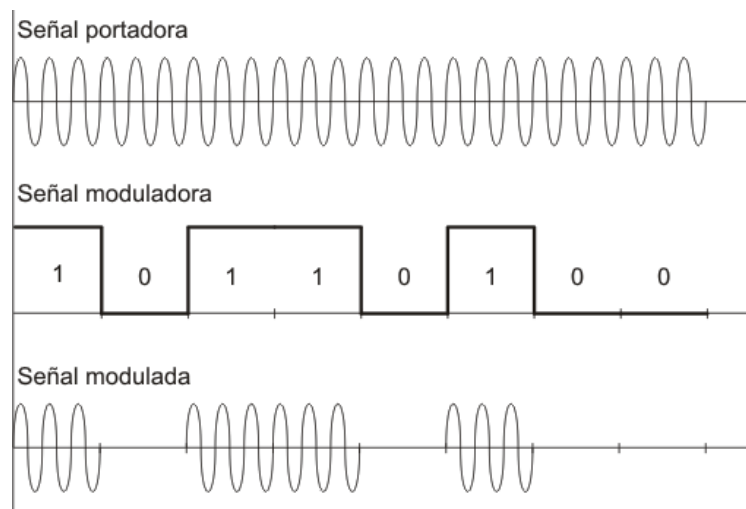


Fig. 3.9 Senyal d'intensitat modulada(23)

#### 3.4.2.1. Modulador d'intensitat mitjançant interferòmetre

El modulador d'intensitat mitjançant interferòmetre utilitza la variació en l'índex de refracció d'una cel·la Pockels per a obtenir un feix de llum de fase modulable, i que presenta un desfasament relatiu amb una altra ona donada.

Per a modificar la intensitat de l'ona resultant s'utilitzen processos d'interferència, és a dir, es combinen els dos feixos de llum que estan desfasats entre ells.

A fi i efecte d'això, s'utilitza l'interferòmetre Mach-Zehnder mostrat en la fig. 3.10. Aquest és un dispositiu òptic que, en primer lloc, divideix una ona única incident en dues ones mitjançant un divisor de feix que reparteix la intensitat òptica al 50% (L1). Cadascuna de les ones prendrà un camí òptic diferent: una d'elles sofrirà un desfasament fix en recórrer un camí òptic d'índex de refracció donat; mentre que l'altra travessarà una cel·la Pockels (equivalent a un modulador de fase) a la qual s'aplica un camp elèctric, que indueix un canvi de fase variable (modulador de fase).

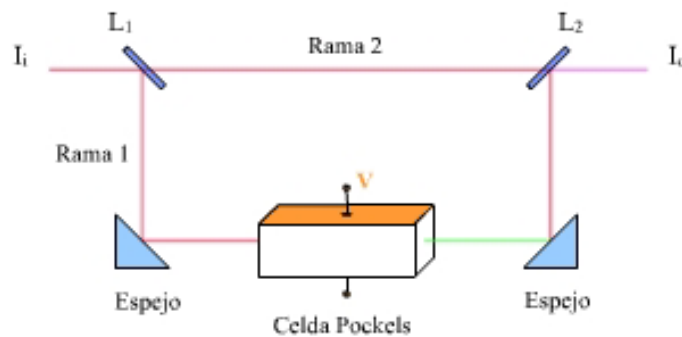


Fig. 3.10 Estructura d'un modulador d'intensitat mitjançant interferòmetre Mach-Zehnder

A la sortida del dispositiu les dues ones, que presenten diferent fase relativa, es tornen a unir per a formar un feix únic (L2). A causa de processos d'interferència, la llum resultant modificarà la seva intensitat, quedant que la intensitat transmesa  $I_0$ , es relaciona amb la incident  $I_i$ , mitjançant l'equació:

$$I_0 = \frac{1}{2}I_i + \frac{1}{2}I_i \cos \varphi = I_i \cos^2 \frac{\varphi}{2} \quad (3.19)$$

Aquesta equació es complirà només quan el divisor de feix L1 divideixi l'energia incident al 50%. Es defineix  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  com la diferència de fase existent entre els feixos de llum que circulen per les dues branques, i és el canvi de fase total induït.

Per al cas particular on  $\varphi = 0$ , el senyal recombinat de sortida tindrà màxima potència. Per al cas  $\varphi = \pi$ , el senyal de sortida serà nul. El rang del modulador d'intensitat està limitat per l'increment de fase entre 0 i  $\pi$ .

Podem veure aquest modulador com un interferòmetre Mach-Zehnder que incorpora a un dels seus braços un modulador de fase. Per tant, tal com hem

explicat en l'apartat anterior, per controlar el desfasament s'utilitza un senyal de voltatge  $V(t)$ . El voltatge de mitja ona per aquest modulador serà, exactament, el mateix que per al modulador de fase.

$$V_{\pi} = \frac{d}{L} \frac{\lambda_0}{rn^3\Gamma} \tag{3.16}$$

A la figura següent es mostra el rang d'operació del modulador i el senyal òptic modulat en funció del senyal d'entrada.

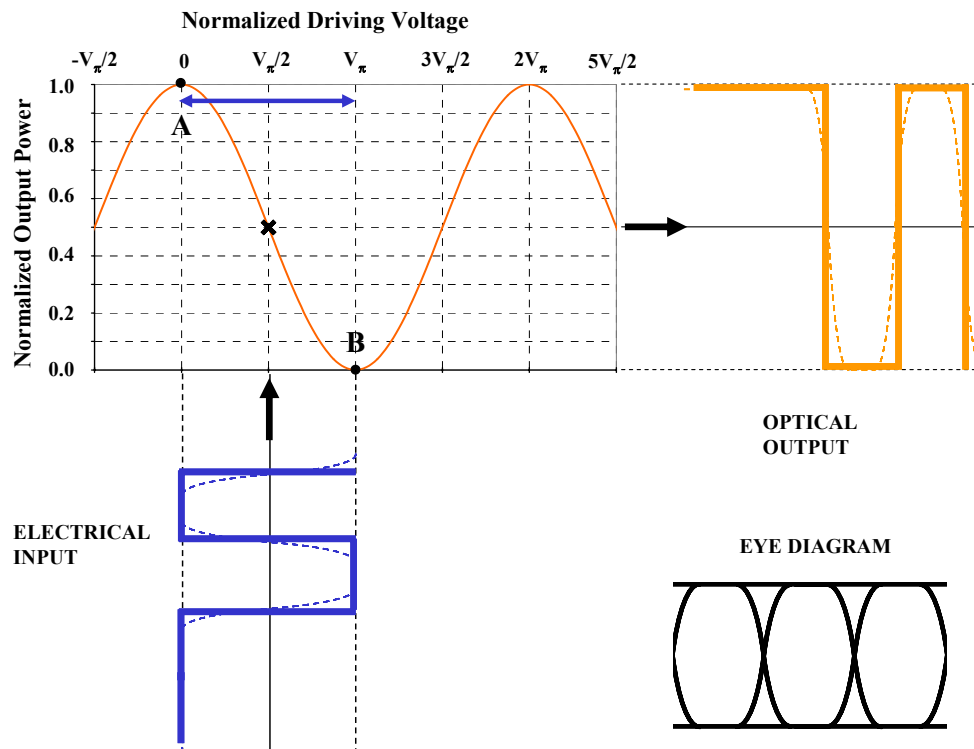


Fig. 3.11 Rang d'operació del modulador Mach-Zehnder (25)

A la pràctica, els moduladors d'intensitat tipus Mach-Zehnder es fabriquen com a dispositius integrats, els quals permeten treballar a altes velocitats, de l'ordre del GHz i amb voltatges de RF petits. (17)

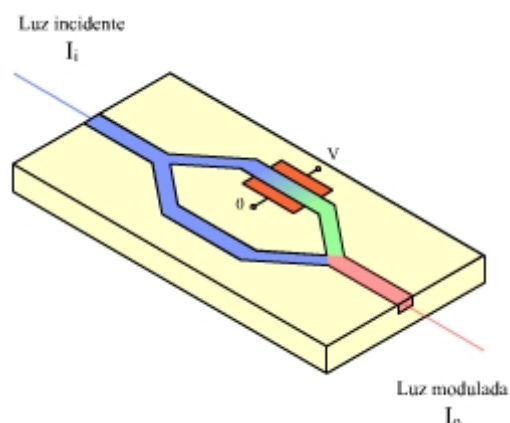


Fig. 3.12 Modulador d'intensitat integrat tipus Mach-Zehnder

### 3.4.2.2. Modulador d'intensitat mitjançant retardador dinàmic

El modulador de fase òptica, en ser inserit entre dos polaritzadors, pot convertir-se en un modulador d'intensitat. És a dir, es pot realitzar un modulador d'amplitud electroòptic combinant una cel·la Pockels amb dos polaritzadors creuats orientats a  $45^\circ$  respecte als eixos del retardador. Això es basa en una cel·la Pockels que modifica la fase de la llum incident i un polaritzador que posteriorment, converteix els canvis de la fase en canvis en l'amplitud òptica emesa. (26)

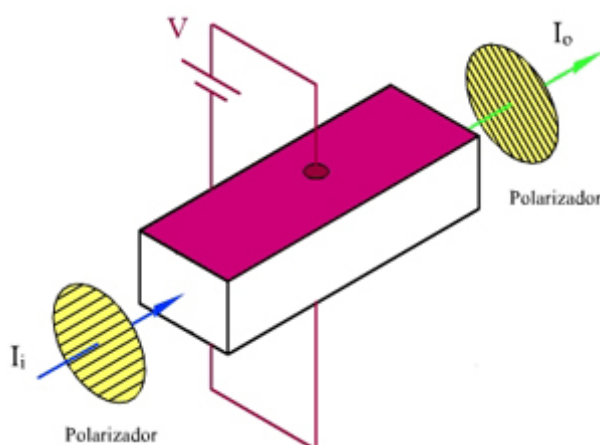


Fig. 3.13 Modulador electroòptic d'intensitat mitjançant retardador dinàmic

### 3.4.3. Modulació de freqüència (FSK)

La modulació per desplaçament de freqüència, del anglès *Frequency Shift Keying (FSK)*, és un esquema de modulació en el qual la informació digital es

transmet a través de canvis de freqüència discrets d'una ona de transmissió. Per exemple, en el cas de tenir una modulació 2-FSK s'utilitzen dues freqüències discretes per transmetre informació binària (0 i 1), una freqüència per transmetre l'1 i una altra per transmetre el 0.

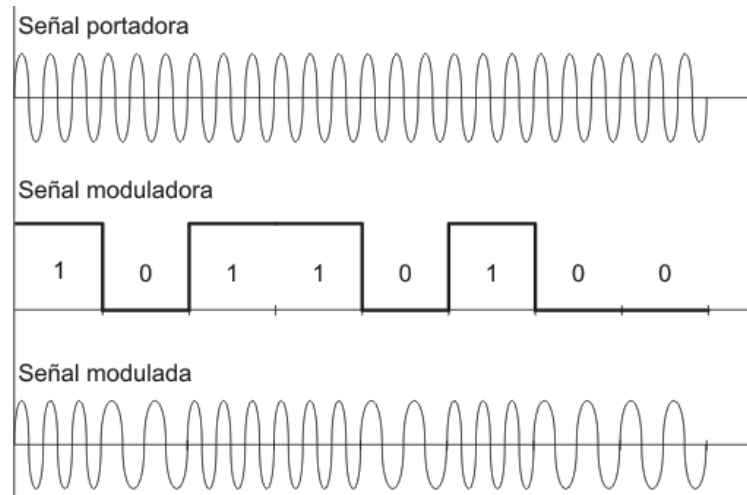


Fig. 3.14 Senyal modulad en freqüència (23)

Una manera d'obtenir un senyal modulad amb freqüència és utilitzant la modulació directa de la font de llum làser però, el *bit rate*, en aquest cas, està limitat per la resposta del làser. El *bit rate* d'una modulació directa de FSK no pot ser superior a 1 GHz (27)

Per aconseguir taxes de bit més grans es necessari l'ús de moduladors externs.

Un exemple de modulador òptic extern de freqüència el podem trobar a la següent referència (27). Aquest consisteix en un parell d'estructures Mach-Zehnder tal com mostra la fig. 3.15. Quan apliquem un parell de senyals de RF que tenen la mateixa freqüència  $f_m$  i tenen una diferència de fase de  $90^\circ$ , entre els elèctrodes  $RF_A$  i  $RF_B$ , un desplaçament de la freqüència pot ser generat al port de sortida del modulador (28) i (29).

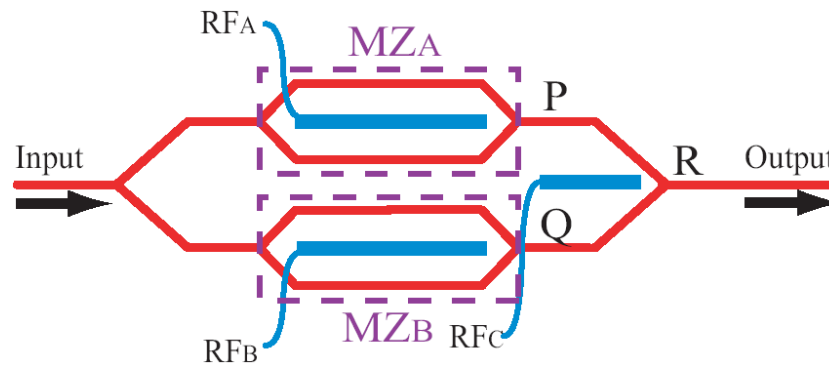


Fig. 3.15 Modulador òptic extern FSK (30)

### 3.4.4. Modulació de polarització (PoISK)

Les tècniques de modulació digital estàndard, com ASK, FSK, PSK, varien l'amplitud i/o la fase d'un dels dos components de l'ona electromagnètica en funció de les dades de la font (essent l'altre component zero).

Com a alternativa a les tècniques de modulació tradicionals com ASK, FSK, PSK, podem utilitzar l'estat de polarització d'una llum totalment polaritzada per tal de modular la informació.

*Polarization shift keying* (PoISK) és una forma de modulació digital, la informació de la qual, està continguda dins de l'estat de polarització d'una llum totalment polaritzada.

Aquesta modulació codifica la informació en una constel·lació de punts de l'espai dels paràmetres de Stokes. Cada punt de la constel·lació correspon a un determinat estat de polarització i a una potència òptica determinada. Si únicament modulem la polarització i no la potència, tots els punts de la constel·lació estaran situats a l'esfera de Poincaré (8)

El principal avantatge de la modulació de polarització és que l'espai tridimensional de Stokes és més eficient per a transmissions multinivell que l'espai bidimensional utilitzat pels esquemes que combinen la modulació de l'amplitud i fase. (15)

A continuació tenim una sèrie d'exemples de diferents constel·lacions amb potència constant:

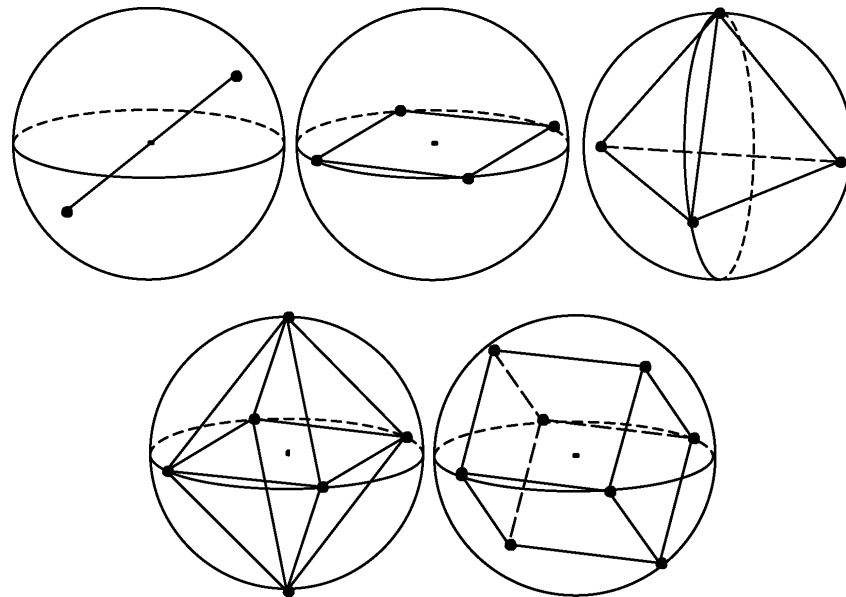


Fig 3.16 Punts de la constel·lació del senyal per alguns exemples d'esquemes de modulació M-PolSK. (a) 2-PolSK, (b) 4-PolSK quadrat, (c) 4-PolSK tetraedre, (d) 6-PolSK icosaèdre, (e) 8-PolSK cup

Per entendre millor aquesta tècnica de modulació posem un exemple de 2-PolSK. Una modulació que envia la informació intercanviant la polarització de la llum transmesa entre 2 SOPs lineals ortogonals (5). Els SOPs poden ser els utilitzats en l'exemple de la fig. 3.17 corresponents a l'estat de polarització vertical per a transmetre un "1" i a l'estat de polarització horitzontal per a transmetre un "0".

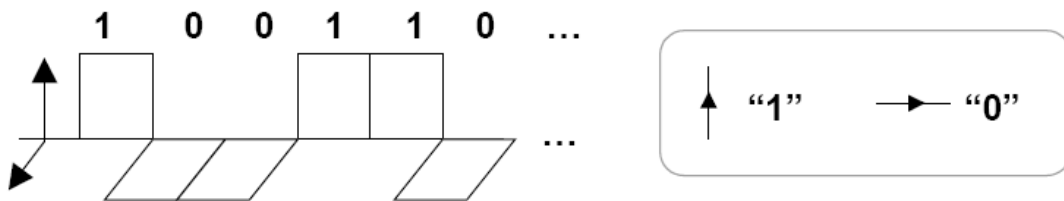


Fig. 3.17 Modulació de polarització binària amb estats de polarització vertical i horitzontal

A la figura següent es mostra el típic encapsulat dels moduladors de polarització. Aquests tenen una entrada i una sortida òptica i una entrada de RF per on introduïrem el senyal de dades a modular.

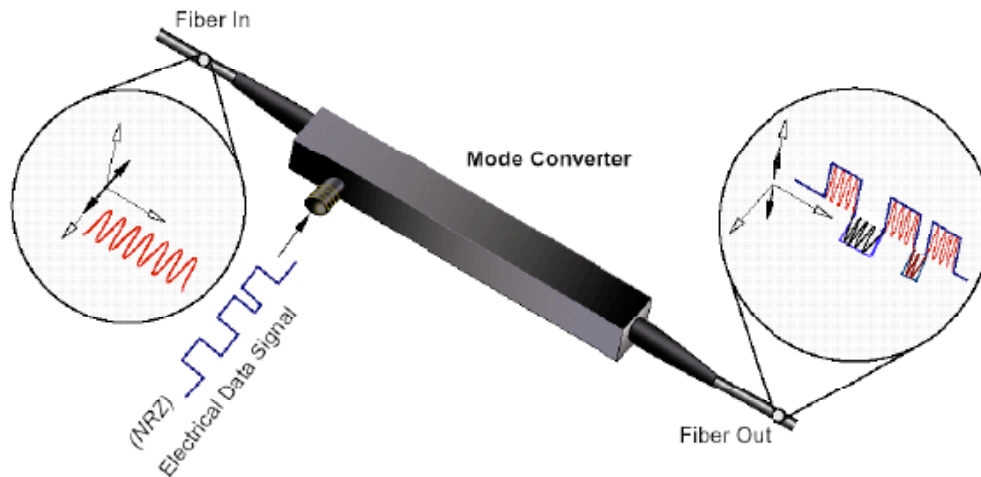


Fig. 3.18 Modulador de polarització (31)

El modulador de polarització el podem veure com a un modulador de fase amb una configuració especial del senyal òptic d'entrada. Aquest, com el modulador de fase, està constituït per un cristall, habitualment Niobat de Liti ( $\text{LiNbO}_3$ ). Si apliquem un voltatge a aquest cristall s'aconsegueix canviar els índexs de refracció dels eixos ordinari (eix x) i extraordinari (eix z). L'increment de l'índex de refracció és diferent per a cada eix; això provocarà un increment del desfasament diferent entre els eixos ordinari i extraordinari. (Veure apartat 3.3 El Niobat de Liti).

Utilitzant les matrius de Jones per expressar matemàticament el comportament del modulador de polarització s'obté:

$$\begin{pmatrix} e^{-j\varphi_0} & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix} \text{ on } \varphi_0 \neq \varphi_e \quad (3.20)$$

La diferència entre el modulador de fase i el de polarització està en la polarització del senyal d'entrada.

Podem diferenciar diverses maneres d'operar del modulador, quan apliquem un senyal elèctric al dispositiu, segons quina sigui la polarització del senyal òptic incident al modulador. Per a llum d'entrada linealment polaritzada, l'angle de la polarització d'entrada respecte a l'eix òptic del cristall determina com s'afectarà la sortida:

- Si l'entrada òptica està linealment polaritzada i alineada amb l'eix extraordinari del cristall del modulador, la sortida sofrirà un desfasament pur sense canviar l'estat de polarització de la llum incident. Aquest efecte s'utilitza en aplicacions on només es necessita un desfasament



del senyal òptic d'entrada (p. ex. en moduladors Mach-Zehnder o moduladors de fase). Expressat matemàticament tenim:

$$\begin{pmatrix} e^{-j\varphi_o} & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

És a dir, la polarització de la llum incident es manté constant, l'únic que varia és la fase d'aquesta. El dispositiu no actua com un modulador de polarització sinó de fase.

- Si la polarització d'entrada s'alinea a l'eix ordinari del cristall, també es produirà un desfasament pur del senyal òptic, la polarització a la sortida serà la mateixa que a l'entrada. En aquest cas el desfasament obtingut serà:

$$\begin{pmatrix} e^{-j\varphi_o} & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-j\varphi_o} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

- Finalment, si la polarització és a  $45^\circ$  respecte els eixos del cristall, la polarització de sortida sofrirà, en general, un canvi de lineal a el·líptica. En aquest mode, el modulador es pot considerar un *waveplate* o retardador electrònicament sintonitzable. (actua com a un modulador de polarització). Ara, el vector de Jones que resulta és:

$$\begin{pmatrix} e^{-j\varphi_o} & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-j\varphi_o} \\ e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

Utilitzant la tercera configuració (entrada òptica amb polarització lineal a  $45^\circ$  respecte els eixos del cristall) el modulador es comportarà com a un modulador de polarització. L'esquema per aquesta configuració es mostra a la fig. 3.19. (32), (33):

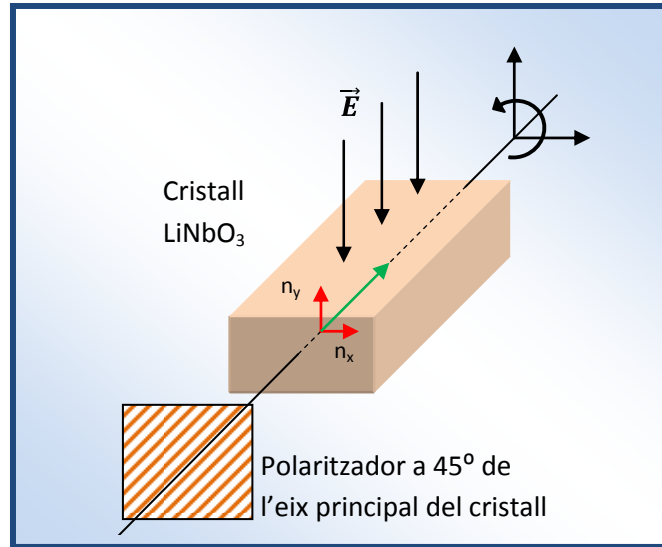


Fig. 3.19 Disseny d'un modulador de polarització basat en un modulador de fase de LiNbO<sub>3</sub>.

Hem dit abans que el modulador de polarització es construeix, habitualment, utilitzant un cristall de Niobat de Liti. Per tant, quan apliquem un voltatge al cristall els índexs de refracció dels eixos ordinari (eix x) i extraordinari (eix z) canvien. Aquest canvi d'índex de refracció provoca un desfasament. L'increment de l'índex de refracció és diferent per a cada eix; això provocarà un increment del desfasament diferent entre els eixos ordinari i extraordinari. Els desfasaments dels eixos els podem expressar de la següent manera:

$$\Delta\varphi_o = \frac{\pi n_o^3 r_{13} \Gamma_{TE}}{\lambda d} LV(t) \tag{3.24}$$

$$\Delta\varphi_e = \frac{\pi n_e^3 r_{33} \Gamma_{TM}}{\lambda d} LV(t) \tag{3.25}$$

Podem expressar aquests desfasaments de la forma següent:

$$\Delta\varphi_o = \pi \frac{V(t)}{V_{\pi_o}} \quad \text{on} \quad V_{\pi_o} = \frac{d}{L} \frac{\lambda_0}{n_o^3 r_{13} \Gamma_{TE}} \tag{3.26}$$

$$\Delta\varphi_e = \pi \frac{V(t)}{V_{\pi_e}} \quad \text{on} \quad V_{\pi_e} = \frac{d}{L} \frac{\lambda_0}{n_e^3 r_{33} \Gamma_{TM}} \tag{3.27}$$

Els paràmetres  $V_{\pi_o}$  i  $V_{\pi_e}$  s'anomenen voltatge de mitja ona. Els valors  $V_{\pi_o}$  i  $V_{\pi_e}$  corresponen als valors del voltatge que s'ha d'aplicar al cristall del modulador per a que la llum incident amb polarització lineal orientada als eixos ordinari i

extraordinari del cristall, respectivament, surti del modulador desfasada  $\pi$  radians.

Per tant, aquests paràmetres ens serveixen per a caracteritzar el modulador quan s'utilitza com a modulador de fase.

Ara volem buscar un paràmetre, similar als voltatges de mitja ona definits per a la modulació de fase, que ens serveixi per a caracteritzar el funcionament del modulador de polarització.

Per a la modulació PoISK el SOP de la llum a la sortida vindrà determinat per la diferència de fase que existeix entre la llum orientada a l'eix extraordinari i la llum orientada a l'eix ordinari.

$$\Delta\Phi_{PoISK} = \Delta\Phi_e - \Delta\Phi_o \quad (3.28)$$

Per tant,

$$\Delta\Phi_{PoISK} = \frac{\pi}{V_{\pi_e}} V(t) - \frac{\pi}{V_{\pi_o}} V(t) = \pi V(t) \cdot \left[ \frac{1}{V_{\pi_e}} - \frac{1}{V_{\pi_o}} \right] \quad (3.29)$$

Podem expressar la diferència de fases de la següent manera:

$$\Delta\Phi_{PoISK} = \frac{\pi}{V_{\pi_{PoISK}}} V(t) \text{ on } V_{\pi_{PoISK}} = \frac{V_{\pi_e} \cdot V_{\pi_o}}{V_{\pi_o} - V_{\pi_e}} \quad (3.30)$$

Es defineix com a voltatge de mitja ona del modulador de polarització el voltatge que s'ha d'aplicar al modulador per a que la diferència de fases  $\Delta\Phi_{PoISK}$  sigui igual a  $\pi$ , i l'anomenem  $V_{\pi_{PoISK}}$ .

**Nota:** Quan apliquem un senyal elèctric d'amplitud  $V_{\pi_{PoISK}}$  i un senyal òptic amb SOP lineal girat  $45^\circ$  respecte als eixos del cristall, la polarització a la sortida del modulador quedarà girada  $\pi$  radians respecte la polarització incident.

Per entendre millor com es comporta el dispositiu podem veure un exemple pràctic del seu funcionament.

Així doncs, analitzarem dues situacions. La primera consisteix en veure que passa quan no s'aplica cap voltatge entre les plaques paral·leles al cristall. En aquest cas, el camp elèctric és  $\vec{E} = 0$ . Això significa que els índex de refracció del cristall no varien i per tant, el senyal òptic de sortida del modulador té la mateixa polarització que el senyal d'entrada.

Matemàticament,

$$\begin{pmatrix} e^{-j\varphi_o} & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-j\varphi_o} \\ e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix} \text{ on } \varphi_o = \varphi_e \Rightarrow e^{-j\varphi_o} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.31)$$

La segona situació consisteix en aplicar un voltatge de  $V_\pi$  al modulador, això provoca que el SOP canviï d'una polarització lineal de  $45^\circ$  a una de  $135^\circ$ .

Matemàticament,

$$\begin{pmatrix} e^{-j\varphi_o} & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-j\varphi_o} \\ e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix} \text{ on } \varphi_e - \varphi_o = \pi \Rightarrow e^{-j\varphi_o} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (3.32)$$

A les figures següents (fig. 3.20 i fig. 3.21) podem observar d'una forma gràfica i clara el comportament descrit abans.

$$\text{Si } V = 0 \Rightarrow \Delta n_o = \Delta n_e \equiv \Delta \varphi_o = \Delta \varphi_e \quad (3.33)$$

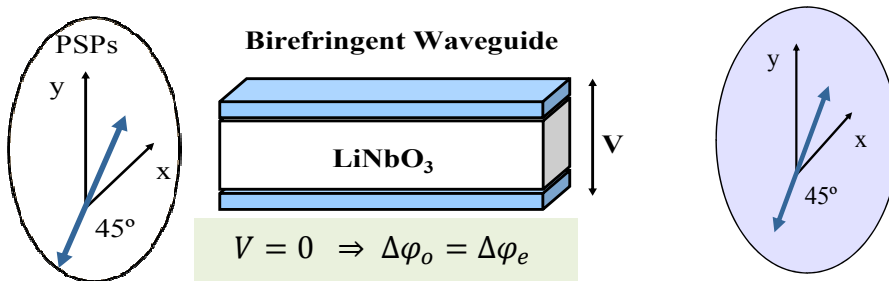


Fig. 3.20 Canvi en la polarització en travessar un cristall de  $\text{LiNbO}_3$  quan no s'aplica voltatge de conducció.

$$\text{Si } V \neq 0 \Rightarrow \Delta n_o \neq \Delta n_e \equiv \Delta \varphi_o \neq \Delta \varphi_e \quad (3.34)$$

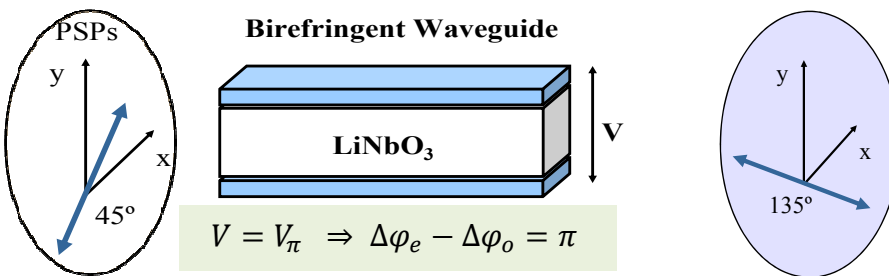


Fig. 3.21 Canvi en la polarització en travessar un cristall de  $\text{LiNbO}_3$  quan s'aplica el voltatge de conducció  $V_\pi$ .

Segons quin sigui el SOP incident i el voltatge aplicat a la guia d'ona podem crear el SOP de sortida desitjat.

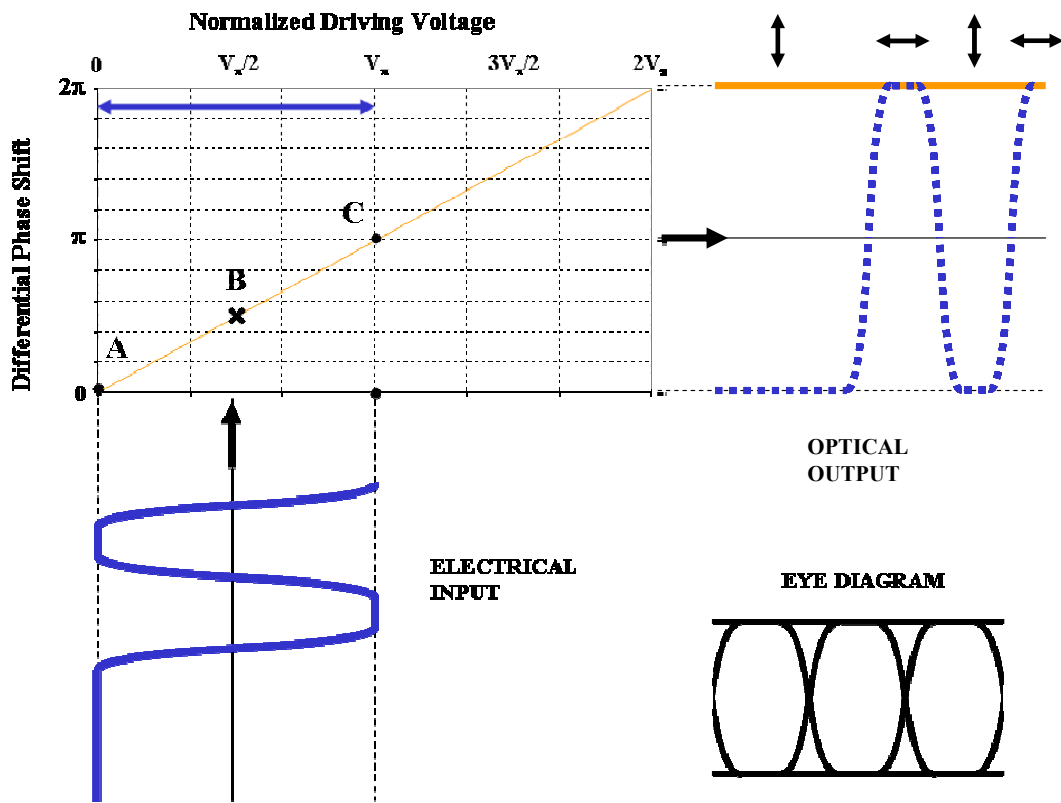


Fig. 3.22 Canvis en l'estat de polarització de la sortida òptica segons el voltatge de conducció que s'aplica. (25)

Les configuracions més significatives del modulador de polarització són les següents (34):

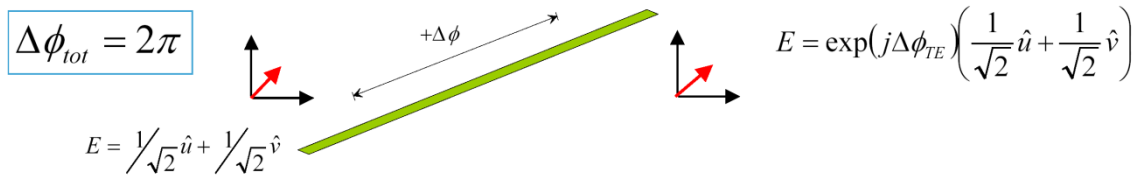
$$\Delta\phi_{tot} = \Delta\phi_{TM} - \Delta\phi_{TE} \quad E = \exp(j\Delta\phi_{TE}) \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{u} + \frac{\exp(j\Delta\phi_{tot})}{\sqrt{2}} \hat{v} \right)$$

$\Delta\phi_{tot} = \pi/2$

$E = \exp(j\Delta\phi_{TE}) \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{u} + \frac{j}{\sqrt{2}} \hat{v} \right)$

$\Delta\phi_{tot} = \pi$

$E = \exp(j\Delta\phi_{TE}) \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{u} - \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{v} \right)$



Els receptors dels sistemes de transmissió que modulen en polarització fan la desmodulació i la detecció en base als paràmetres de Stokes. En la seva forma més general, el receptor d'un sistema PolSK extreu els paràmetres d'Stokes, que descriuen plenament el SOP de la llum rebuda i basen la decisió en aquests valors. (35).

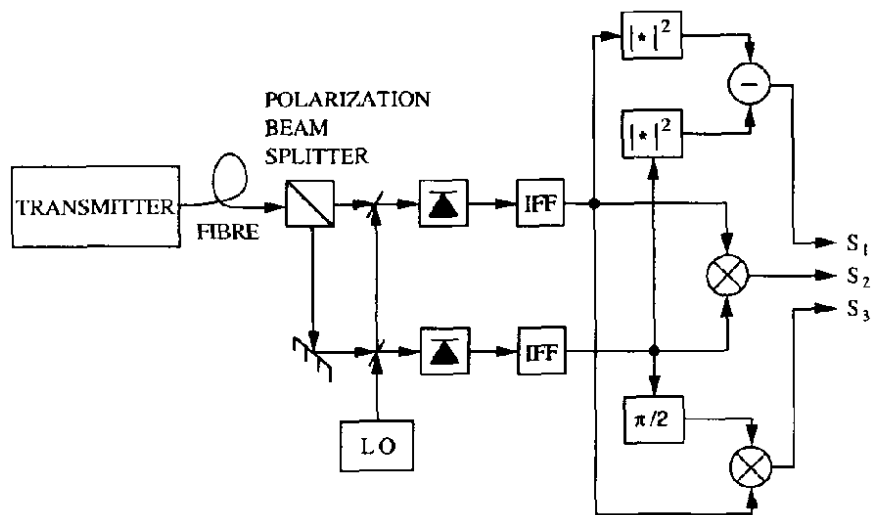


Fig. 3.23 Diagrama de blocs d'un receptor de M-PolSK basat en l'extracció del paràmetres d'Stokes (5)

**3.4.4.1. Avantatges que ens proporciona l'ús de la polarització com a mètode per a transmetre informació per un medi òptic**

En el cas d'una fibra monomode alimentada amb una font de llum monocromàtica, un parell de SOPs ortogonals a l'entrada de la fibra, donen a la sortida un parell de SOPs ortogonals encara que l'estat de polarització d'entrada no es manté en general. (5)

Quan una llum polaritzada es enviada a través d'una fibra òptica monomode, és ben conegut que l'estat de polarització s'altera, a causa de la birefringència del canal. Encara que, si mirem les constel·lacions podem observar que els canvis a causa de la birefringència únicament ocasionen una rotació rígida de la constel·lació de l'esfera de Poincaré. Això fa que, la relació espacial entre els punts es preservi i, com a resultat, la informació no es corrompi si es codifica

de forma diferencial. Aquesta rotació pot ser compensada per un processat electrònic al receptor.

El fenomen de la despolarització o les pèrdues que depenen de la polarització són de poca importància inclús en fibres relativament llargues, i per tant, són negligibles. (5).

En resum, podem dir que la modulació de polarització és robusta als *impairments* de transmissió.

#### 3.4.4.2. Aplicacions del modulador de polarització

El modulador de polarització, no serveix únicament com a mètode per a modular i transmetre la informació a través d'un medi òptic, sinó que, aquest ens pot servir per a realitzar altres funcions. Entre elles, estan el *polarization scrambler*, el *polarization switch* i el *polarization multiplexer*.

Els efectes de la polarització poden degradar sèriament el rendiment de molts sistemes òptics. Alguns exemples d'això són el *polarization fading* en la detecció heterodina o el *Polarization Dependent Gain* en *long-haul Erbium Doped Fiber Amplifiers* (EDFA). Una possible forma de superar aquest problema consisteix en la inserció d'un ***polarization scrambler*** en la trajectòria del senyal. Els *polarization scramblers* són utilitzats sovint en molts sistemes de mesura òptics. També són utilitzats per a millorar per exemple, els sistemes d'amplificació òptica com ara els EDFAs o per a combatre els efectes del *Polarization Dependent Loss* (PDL) o del *Polarization Mode Dispersion* (PMD) (36).

Per entendre com podem utilitzar el modulador de polarització com a *polarization scrambler*, hem de pensar que el modulador actua com un simple retardador de fase variable orientat amb un angle de  $0^\circ$  i indueix un retard de fase variable entre les components ortogonals a  $0^\circ$  i  $90^\circ$ . Això és així, si injectem llum polaritzada linealment a  $45^\circ$  respecte els eixos del modulador (37).

Es ben conegut que un retardador de fase variable pot servir com a un *polarization scrambler*. Aquests *scramblers* típicament produiran SOPs de sortida que escanejaran periòdicament un cercle complet o incomplet de l'esfera de Poincaré. Aquest efecte el podem observar a la fig. 3.25 (38).

Per tant, si injectem una llum linealment polaritzada a  $45^\circ$  al modulador de polarització i el modulem amb un senyal sinusoidal a freqüència  $\Omega/2\pi$  s'obté a la sortida del mateix un SOP que va variant periòdicament tal com mostra la figura següent:

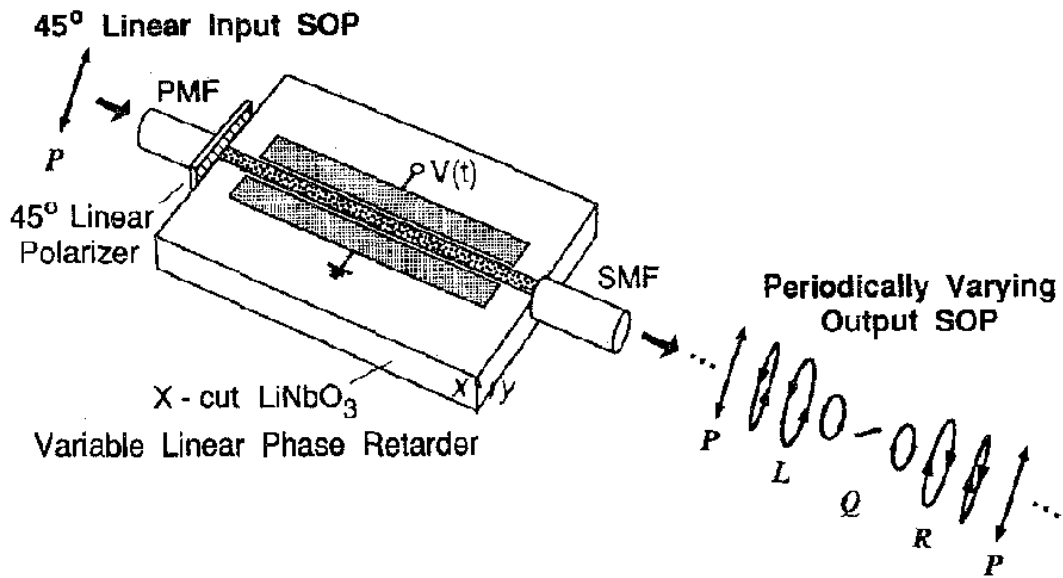


Fig. 3.24 Configuració del modulador de polarització per a que funcioni com un *polarization scrambler* (38)

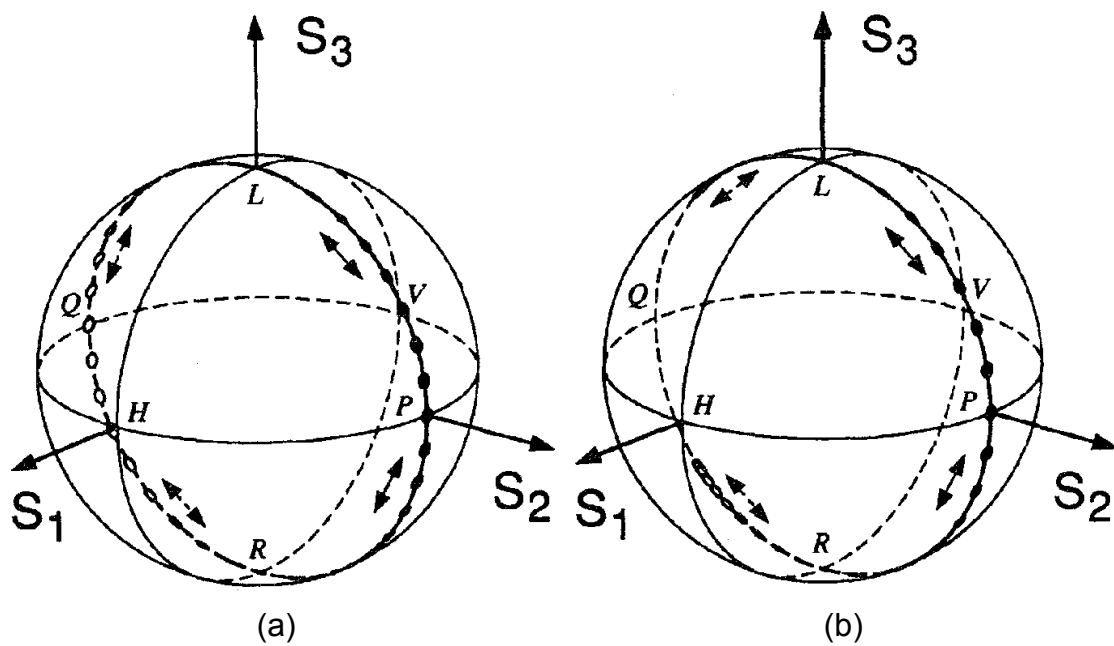


Fig. 3.25 Representació dels canvis de polarització del SOP de sortida d'un retardador de fase variable modulad a la freqüència  $\Omega/2\pi$ : (a) entre  $-\pi$  i  $+\pi$ ; (b) entre  $-0.7655\pi$  i  $0.7655\pi$ . El retardador de fase està orientat a  $0^\circ$  i el SOP incident és lineal a  $45^\circ$ . (38)

Amb un modulador de polarització configurat per a què funcioni com a un *polarization scrambler* s'aconsegueix que la polarització segueixi un camí determinat i conegut. Si volem millorar aquest comportament podem construir



un *polarization scrambler* de dues etapes o més, posant en cascada diversos moduladors amb diferents orientacions i alimentant-los amb senyals de modulació de freqüència diferent. El principal avantatge d'utilitzar un *scrambler* multi-etapa és que, aquest, té l'habilitat de depolaritzar la llum independentment del SOP d'entrada; això permet aplicacions on el SOP incident sigui desconegut o que variï amb el temps. Una possible configuració del *scrambler* multi-etapa la podem veure a la fig. 3.26.

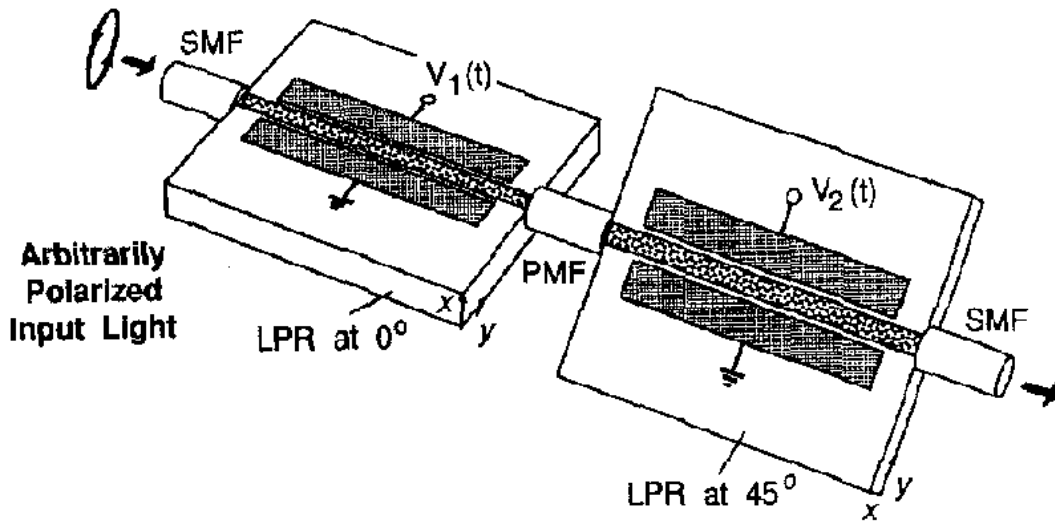


Fig. 3.26 *Polarization Scrambler* de dues etapes utilitzant dos moduladors de polarització orientats a  $0^\circ$  i  $45^\circ$ . (38)

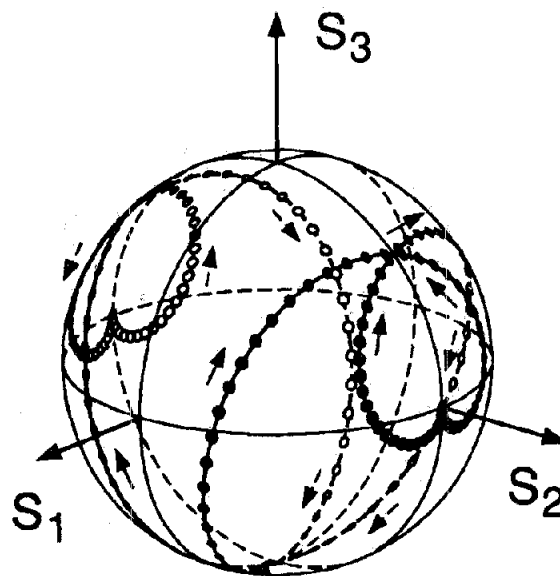


Fig. 3.27 Traça a l'esfera de Poincaré del SOP de sortida d'un *polarization scrambler* de doble etapa orientats amb  $0^\circ$  i  $45^\circ$  i modulats amb freqüències  $\Omega/2\pi$  i  $2\Omega/\pi$ . (38)

El **polarization switch**, tal com hem dit abans, és una altra aplicació del modulador de polarització.

La motivació de tots els esquemes dissenyats per a commutar la polarització és la de variar el SOP del senyal transmès al llarg del temps per tal de fer que la detecció del senyal sigui independent de la polarització. Podem entendre això com una mena de diversitat en polarització, és a dir, enviem la informació a transmetre en diferents estats de polarització.

Idealment, els canvis de polarització haurien de cobrir dos estats ortogonals durant un període de bit. El període de commutació o *switch rate* ha de ser un múltiple enter del *bit rate*. Un exemple el podem veure a la següent il·lustració (39), (40):

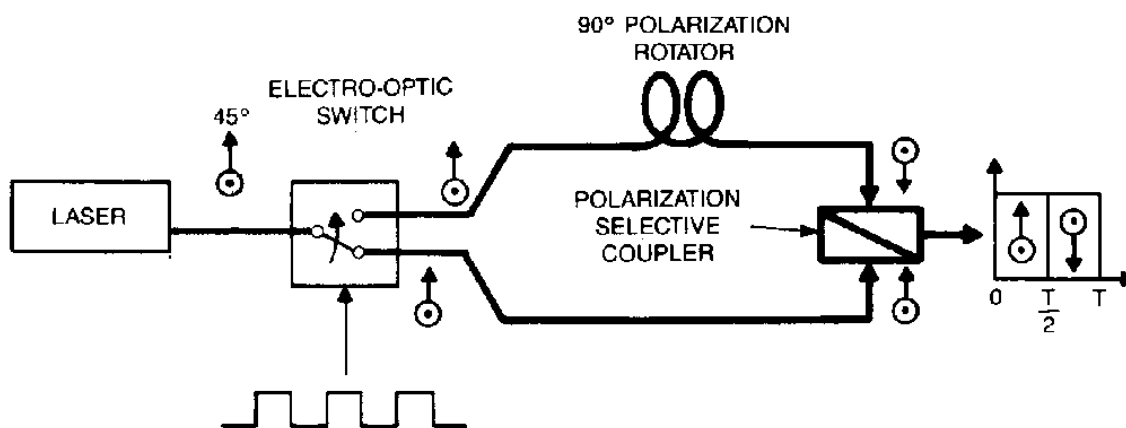


Fig. 3.28 *Polarization Switching* de dues branques. El làser es canvia periòdicament entre dos camins, un dels quals alterna la polarització 90°. A la sortida de l'acoblador hi ha un senyal òptic la polarització del qual canvia entre dos estats ortogonals durant un període de bit.

Una manera de fer això és utilitzant un dispositiu electroòptic com pot ser el modulador de polarització. El làser pot ser commutat entre dos camins o estats de polarització diferents, un d'ells amb la polarització girada 90° respecte l'altra. És a dir, la sortida del modulador de polarització anirà commutant entre dos polaritzacions ortogonals durant un període de bit.

Un esquema simplificat podria ser el següent:

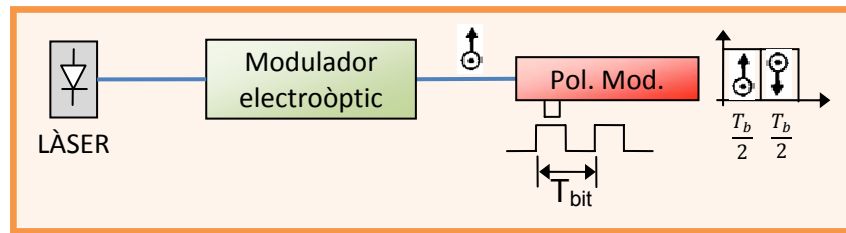


Fig. 3.29 Exemple d'ús del modulador de polarització com a *polarization switching*

El modulador de polarització pot rotar l'estat de polarització d'entrada de la llum incident amb un angle fixat  $45^\circ$  o  $90^\circ$ .

S'han de diferenciar dues versions: la que utilitza PMF a la sortida del modulador i la que utilitza SMF. Amb l'opció PMF el dispositiu funciona com un convertidor TE-TM, commutant el SOP entre l'eix lent i l'eix ràpid de la fibra mantenedora o entre l'eix lent i  $45^\circ$  respecte l'eix lent. A la versió que utilitza la fibra SM, el dispositiu simplement girarà la polarització  $45^\circ$  o  $90^\circ$  graus.

Finalment, també podem utilitzar el modulador de polarització com a ***polarization multiplexer***, és a dir, podem transmetre dos senyals amb la mateixa longitud d'ona amb estats de polarització ortogonals. D'aquesta manera es pot doblar l'eficiència espectral. Els esquemes de transmissió que utilitzen aquesta tècnica hauran de tenir en compte la dispersió per mode de polarització (PMD) i les pèrdues que depenen de la polarització (PDL).



# 4. Caracterització del modulador de polarització

## 4.1. Introducció

En aquesta secció es realitzarà la caracterització del modulador electroòptic de polarització fabricat amb tecnologia integrada.

En primer lloc, es realitzaran unes mesures a freqüència baixa, amb l'ajut d'un polarímetre. Això ens servirà per a entendre com funciona el modulador de polarització. En segon lloc, es descriurà el procés de mesura del voltatge  $V_{\pi}$ . Després, es caracteritzarà el modulador de polarització funcionant com a modulador de fase. Finalment, es compararan els resultats obtinguts experimentalment amb les especificacions del modulador, que es troben a l'annex 1.

La fig. 4.1 mostra la vista exterior del modulador que volem caracteritzar. Per tal de facilitar el seu maneig s'ha muntat el modulador en una caixa. D'aquesta manera, es podrà manipular i muntar els circuits requerits per a realitzar les mesures amb major eficiència i fiabilitat.

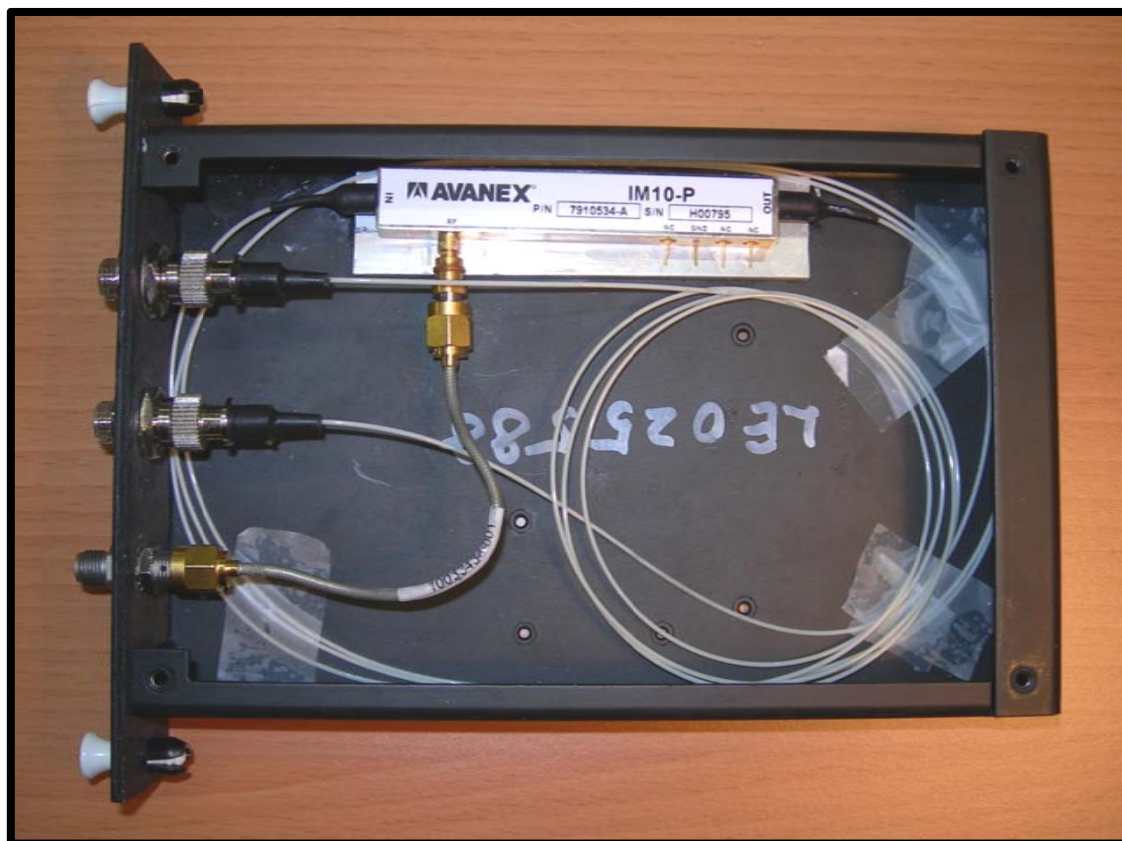


Fig. 4.1 Modulador de polarització a caracteritzar

## 4.2. Estudis previs

Abans de començar a fer les mesures dels paràmetres característics del modulador de polarització s'han de tenir en compte una sèrie de factors.

Primer de tot, s'ha d'esbrinar com es comporten les fibres mantenidores (PM) davant els diferents estats de polarització. També s'ha d'esbrinar quins eixos de coordenades o quina referència utilitza l'analitzador de polarització per a realitzar les mesures i, finalment, quin estat de polarització té la llum procedent de la font làser que s'utilitzarà per a efectuar les mesures.

### 4.2.1. Comportament fibres mantenidores

És un error pensar que una fibra PM és capaç de no alterar l'estat de polarització d'un senyal òptic independentment del SOP que aquest tingui. Les fibres PM no mantenen la polarització per qualsevol SOP de la llum que incideix a la fibra. De fet, les fibres PM alteren l'estat de polarització excepte en dos casos molt concrets:

- Quan la llum incident té un SOP lineal orientat amb l'eix ordinari de la fibra (eix lent).
- Quan la llum incident té un SOP lineal orientat amb l'eix extraordinari de la fibra (eix ràpid).

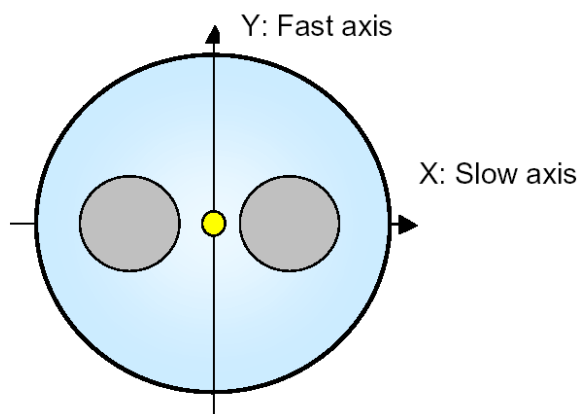


Fig. 4.2 Eixos de polarització d'una fibra PANDA (41)

Els *patchcords* comercials permeten diferents orientacions dels seus eixos, però, en la majoria de casos, els eixos dels *patchcords* solen estar alineats de la següent manera:

- Eix lent (o eix ordinari) alineat verticalment a la pestanya dels connectors.
- Eix ràpid (o extraordinari) alineat perpendicularment a la pestanya dels connectors.

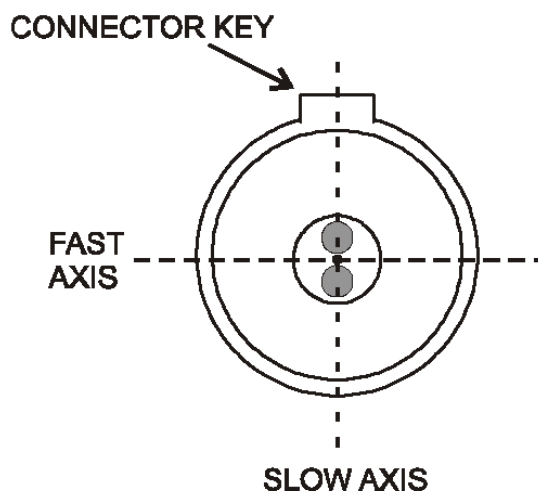


Fig. 4.3 Fibra PM PANDA amb l'eix lent alineat amb la pestanya del connector (42)

Per a les fibres mantenedores utilitzades en tots els experiments que es realitzen en aquest projecte s'ha comprovat que totes elles estan alineades amb la pestanya del connector de la fibra tal com mostra la fig. 4.3.

### 4.2.2. El polarímetre

El polarímetre o analitzador de polarització és un aparell que ens permet mesurar l'estat de polarització de la llum (SOP), el seu grau de polarització (DOP) i la seva potència òptica.

Un punt important a tenir en compte és quins eixos de referència utilitza el polarímetre per a realitzar les mesures. El polarímetre mesura l'estat de polarització de la llum segons uns eixos de l'esfera de Poincaré relatius. Per tant, les mesures de l'estat de polarització de la llum d'un senyal òptic dependran de quins siguin els eixos de referència. Aquests eixos poden ser canviats mitjançant l'aplicació informàtica que controla el polarímetre. Per tant, el polarímetre només ens permet fer mesures relatives a un estat de polarització concret que podem escollir.

Per dur a terme les mesures s'hauran d'establir uns eixos de coordenades o referència de l'esfera de Poincaré. En totes les mesures que es realitzaran s'ha escollit com a punt de referència l'estat de polarització que corresponen a l'eix de la fibra PM d'entrada del modulador de polarització. És a dir, es fa coincidir la polarització lineal alineada amb l'eix de la fibra amb la polarització lineal vertical (vector de Stokes  $S = (1, -1, 0, 0)$ ).

### 4.2.3. Polarització de sortida del làser

El primer que s'ha de fer per a poder mesurar correctament les característiques del modulador de polarització és esbrinar en quin estat de polarització surt la llum procedent del làser.

Una idea inicial que se'ns pot ocórrer per a esbrinar quin es el SOP de la llum procedent de la font làser que s'utilitzarà per a fer els experiments, és utilitzar el polarímetre tot emprant el set-up següent:

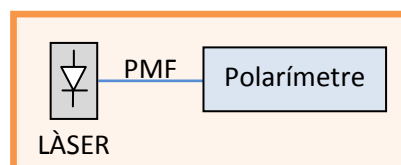


Fig. 4.4 Set-up de mesura de la polarització del làser



Però hem d'anar amb molt de compte, tal com s'ha comentat abans; la fibra PM no manté tots els estats de polarització, sinó que només ho fa per dos casos concrets. Això és quan la llum incideix amb polarització alineada amb un dels eixos de la fibra. A més a més, el polarímetre realitza les mesures segons un eixos relatius com ja s'ha comentat.

És lògic pensar que l'estat de polarització del làser sigui lineal orientat verticalment. D'aquesta manera quan hi connectes una fibra PM estàndard (eixos alineats amb la pestanya del connector) la llum incidirà per l'eix de la fibra i per tant, mantindrà la polarització.

Dit això, podem utilitzar el *set-up* de la fig. 4.4 per a verificar si el làser i les fibres mantenidores del laboratori tenen els mateixos eixos.

Si fos així, en el polarímetre s'hauria de veure un punt a l'esfera de Poincaré, és a dir, un SOP estable que no variés amb els moviments de la fibra mantenedora, els girs de la mateixa o els canvis de temperatura.

El resultat obtingut és el següent:

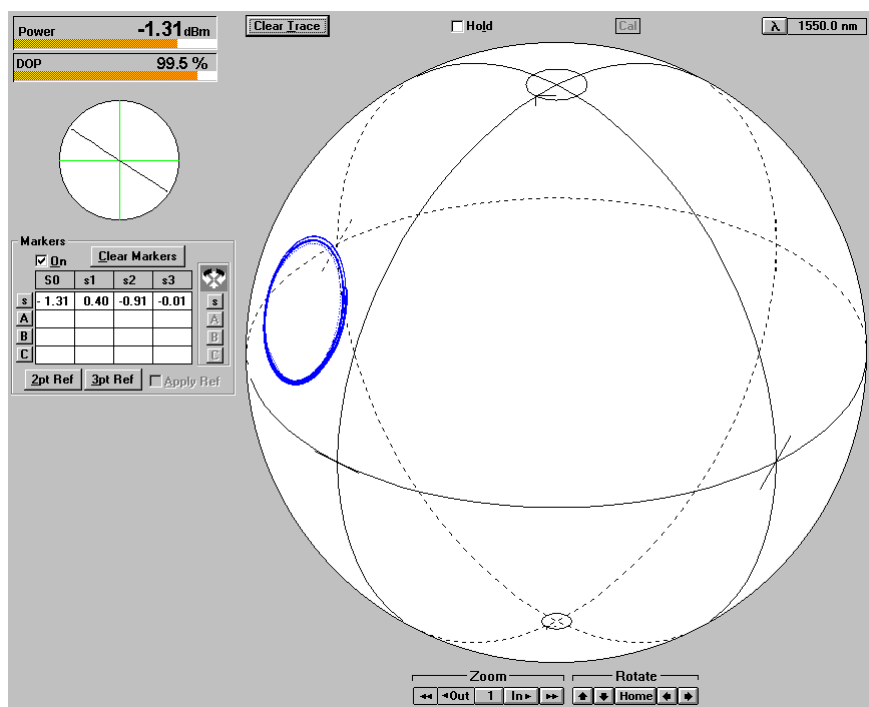


Fig. 4.5 Polarització de sortida del làser.

S'observa a l'esfera de Poincaré de la fig. 4.5 l'estat de polarització de la llum de sortida del làser. No es pot concloure res, com ja s'ha esmentat abans, de quin és l'estat de polarització de sortida del làser perquè es tracta d'una mesura relativa. Però, si que es pot observar que la polarització es manté constant al voltant d'un punt de l'esfera de Poincaré. El resultat que s'esperava era un punt

a l'esfera de Poincaré i no un cercle com s'observa a la fig. 4.5. Tot i això, els canvis que provoquen els moviments de la fibra PM són força petits (cercle de radi reduït). Per tant, podem concloure que el SOP de la font làser és lineal orientat amb la pestanya del connector, igual que les fibres PM.

La petita variació del SOP que s'observa pot ser deguda a la tolerància que tenen els connectors de les fibres. La fibra de sortida del làser i la fibra PM poden no estar perfectament alineades provocant que el SOP mesurat variï lleugerament.

Per tant, es pot afirmar que:

- La polarització de sortida del làser és lineal orientada amb la pestanya del connector de sortida.
- Les fibres mantenedores també estan alineades amb la pestanya del connector de la fibra.

Un cop coneguda la polarització de la llum de sortida del làser, el següent pas és demostrar que el modulador funciona tal com s'ha il·lustrat a nivell teòric en els apartats anterior del present projecte. Per fer-ho s'han realitzat una sèrie de mesures i s'han comparat amb els coneixements teòrics sobre els moduladors de polarització electroòptics de Niobat de Liti.

### 4.3. Caracterització amb el polarímetre.

Per tal de comprovar i aclarir de forma senzilla i ràpida el funcionament dels moduladors de polarització s'han efectuat unes mesures amb l'analitzador de polarització HP-8509B.

Per a realitzar aquestes mesures cal injectar un senyal òptic al modulador amb polarització coneguda i estudiar el comportament del senyal de sortida mitjançant l'analitzador de polarització o polarímetre quan introduïm un senyal de RF adequat. Degut a les limitacions del polarímetre, freqüència de mostreig del HP-8509B d'1 kHz, s'ha d'utilitzar una velocitat de modulació molt baixa. En l'experiment utilitzarem freqüències entre 0.5 i 10 Hz.

L'esquema utilitzat per fer aquestes mesures és el següent:

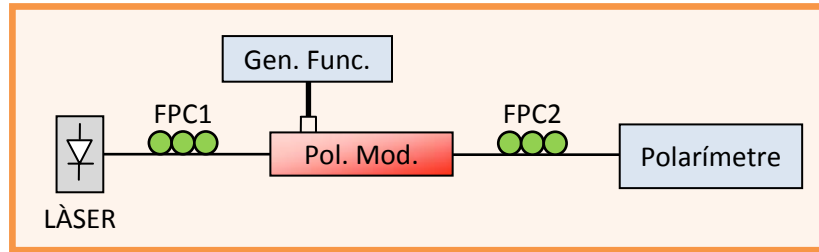


Fig. 4.6 *Set-up* de mesura del comportament del modulador amb el polarímetre

El *set-up* de la fig. 4.6 utilitza, just abans de l'entrada òptica del modulador de polarització, un controlador de polarització de fibra enrotllada que permet canviar qualsevol SOP d'entrada en qualsevol SOP de sortida.

La fibra de sortida del modulador de polarització és una fibra estàndard i per tant, no manté la polarització. Tal com hem explicat a l'apartat 3.4.4, la birefringència de la fibra altera la polarització, però manté la relació espacial entre els punts de l'esfera de Poincaré. El segon FPC (*Fiber Polarization Controller*) ens serveix per corregir la rotació introduïda per aquesta fibra. D'aquesta manera podem fer més intel·ligibles els resultats obtinguts.

En l'apartat 3.4.4 s'ha explicat el comportament del modulador de polarització a nivell teòric. S'ha vist que el comportament del modulador depèn de l'estat de polarització del senyal òptic incident al modulador i s'han diferenciat tres casos:

- SOP d'entrada alineat amb l'eix extraordinari del cristall de Niobat de Liti
- SOP d'entrada alineat amb l'eix ordinari del cristall
- SOP d'entrada girat  $45^\circ$  respecte els eixos del cristall.

El que es pretén amb aquest experiment és corroborar el comportament descrit anteriorment.

**NOTA:** És important saber com està alineada la fibra d'entrada respecte al cristall de Niobat de Liti. El modulador del laboratori està configurat de tal manera que, l'eix de la fibra PM d'entrada del modulador forma un angle de  $45^\circ$  respecte els eixos del cristall de  $\text{LiNbO}_3$ . Per tant, quan s'injecta un senyal òptic polaritzat linealment alineat amb l'eix de la fibra, s'està entrant al cristall del modulador amb un angle de  $45^\circ$  respecte als eixos del cristall.

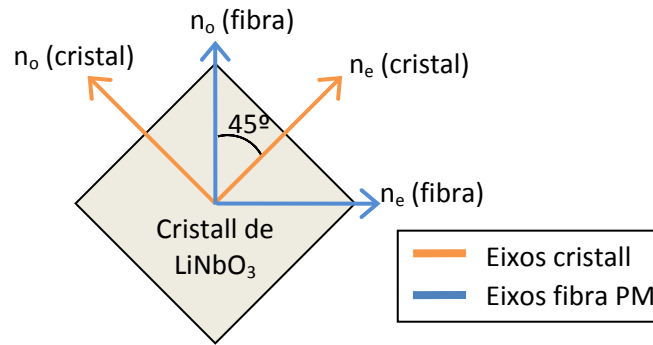


Fig. 4.7 Eixos fibra PM respecte eixos del cristall de Niobat de Liti

Es faran les següents mesures per a caracteritzar el modulador a baixa freqüència:

- **Mesura 1:** Senyal òptic incident alineat amb l'eix de la fibra d'entrada del modulador (això és equivalent a entrar al modulador amb una polarització girada  $45^\circ$  respecte als eixos del cristall de Niobat de Liti).
  - **Mesura 2:** Senyal òptic girat  $45^\circ$  o  $-45^\circ$  respecte l'eix de la fibra d'entrada del modulador (això és equivalent a entrar per l'eix ordinari o extraordinari del cristall).
  - **Mesura 3:** Senyal òptic amb SOP qualsevol (diferents dels dos casos anteriors, ni alineat amb els eixos del cristall, ni girat  $45^\circ$  respecte dels mateixos).
- **Mesura1**

El primer pas consisteix en manipular el FPC1 fins a obtenir un SOP d'entrada al modulador alineat a un dels eixos de la fibra, és a dir, un senyal òptic amb polarització lineal verticalment o horitzontalment respecte la fig. 4.7.

Com es pot saber quan el SOP de la llum incident està alineat amb l'eix de la fibra?

Una forma senzilla i eficient de saber que el senyal òptic que estem injectant al modulador té polarització lineal alineada a l'eix de la fibra és utilitzant les propietats de les fibres PM. Sabem, pel que s'ha explicat a l'apartat 4.2.1, que les fibres mantenedores només conserven la polarització quan el senyal òptic té una polarització lineal orientada a l'eix ràpid o l'eix lent de la fibra. Per tant, podem anar variant, mitjançant el FPC1, l'estat de polarització a l'entrada del modulador fins que quedi alineat amb l'eix de la fibra d'entrada. En aquest cas,

qualsevol moviment de la fibra d'entrada del modulador no tindrà cap efecte en el SOP de sortida que el polarímetre està mesurant.

Un cop ja tenim la polarització desitjada a l'entrada del modulador, el següent pas és establir la referència de mesura del polarímetre tal com s'ha explicat a l'apartat 4.2.2.

En tercer lloc, utilitzem un generador de funcions per a modular l'estat de polarització de la llum. Configurem el generador amb un senyal quadrat d'aproximadament 6 V pic a pic (corresponent al valor de  $V\pi$  indicat a les especificacions del modulador, veure annex 1) i freqüència 0.5 Hz. Aquesta freqüència ens permetrà veure els salts de polarització que realitza el senyal modulad.

Tal com estàvem esperant, quan modulem amb un senyal quadrat d'amplitud el voltatge de mitja ona i la llum incident és una llum linealment polaritzada i alineat amb l'eix de la fibra PM d'entrada del modulador, s'obté una modulació de polarització òptima. El senyal de sortida del modulador va intercanviant l'estat de polarització de la llum entre dos punts oposats de l'esfera de Poincaré.

Matemàticament, es pot expressar el resultat de la següent manera:

$$\begin{pmatrix} e^{-j\varphi_o} & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-j\varphi_o} \\ e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

**Nota:**  $\begin{pmatrix} e^{-j\varphi_o} & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix}$  és la matriu de Jones del modulador i  $\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$  el vector de Jones de la llum incident al modulador, prenent com a eixos de coordenades els eixos del cristall.

Per compensar el gir de la polarització que provoca la fibra de sortida del modulador hem de manipular el FPC2 i d'aquesta manera, situar els dos estats de polarització oposats en punts coneguts de l'esfera de Poincaré per facilitar la comprensió dels resultats. A la figura següent veiem que l'estat de polarització de la llum va commutant entre l'estat de polarització lineal horitzontal i el lineal vertical.

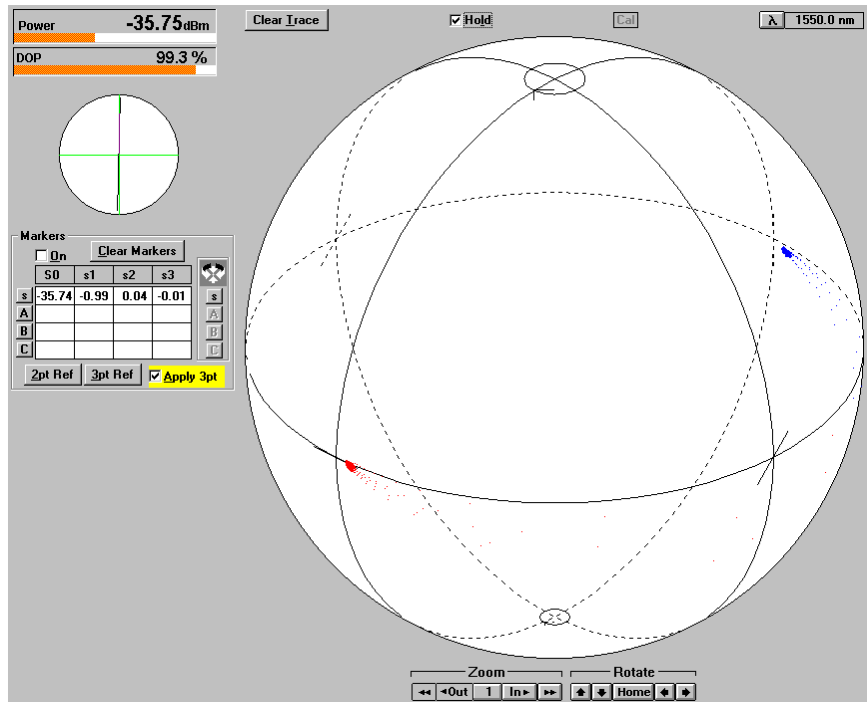


Fig. 4.8 Resultat d'injectar un senyal òptic amb polarització lineal alineada a l'eix de la fibra PM d'entrada del modulador modulat amb un senyal quadrat de freqüència 0.5 Hz i amplitud 6 V

Vist això, podem intercanviar el senyal quadrat per un senyal sinusoidal de la mateixa freqüència i amplitud. D'aquesta manera podem veure l'evolució del SOP a mesura que va augmentant el valor del voltatge de RF.

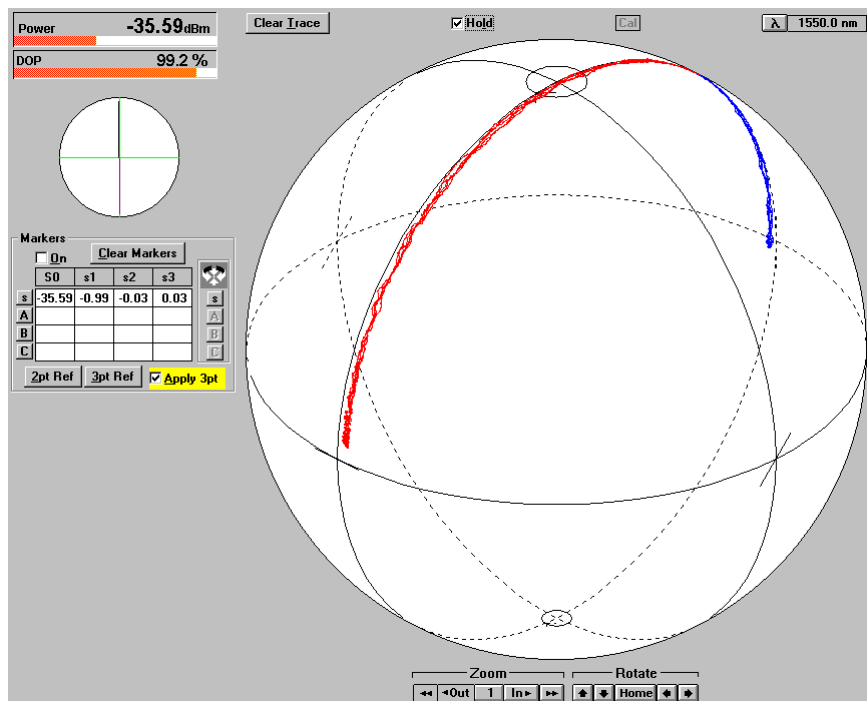


Fig. 4.9 Evolució del SOP de la llum incident quan modulem amb un senyal sinusoidal amb voltatge  $V\pi$

Per tant, podem afirmar que quan el SOP incident esta alineat amb l'eix de la fibra, el senyal òptic entra amb una polarització lineal que forma un angle de  $45^\circ$  amb l'eix del cristall de Niobat de Liti (veure fig. 4.7) i això significa que aquesta és la configuració òptima per a utilitzar el modulador com a modulador de polarització.

- **Mesura 2**

Ara, es vol caracteritzar el modulador de polarització quan hi injectem un estat de polarització girat  $45^\circ$  respecte l'eix de la fibra d'entrada del modulador. Això és equivalent a dir, que la polarització incident al cristall de  $\text{LiNbO}_3$  està orientada a un dels eixos del cristall (l'ordinari o l'extraordinari) i, per tant, el modulador hauria de comportar-se com un modulador de fase (PSK).

El primer problema que es planteja és com alinear la polarització als eixos ordinari o extraordinari del cristall. Per aconseguir-ho podem utilitzar el mètode següent. Sabem que el modulador de polarització actua com a modulador de fase quan el senyal òptic incideix amb un angle de  $45^\circ$  respecte els eixos de la fibra. Per tant, la polarització de sortida del modulador haurà de mantenir-se estable, encara que hi introduïm un senyal de RF que moduli el senyal òptic (actua com a modulador de fase no com a modulador de polarització).

Utilitzant el *set-up* de la fig. 4.6 amb el generador configurat amb un senyal sinusoidal d'amplitud  $V_\pi$  s'anirà manipulant el FPC1 fins aconseguir que l'estat de polarització vist en el polarímetre no canviï. Quan això sigui així, l'estat de polarització d'entrada al modulador estarà orientat a un dels eixos del cristall del modulador.

Un cop fet això, apliquem un senyal quadrat de freqüència 0.5 Hz. Podem veure a la fig. 4.10 que la polarització de la llum a la sortida del modulador no commuta entre dos estats ortogonals. En aquest cas, la polarització es manté constant. Això significa que no estem modulant en polarització el senyal òptic. Aquests resultats són coherents amb els estudis previs que s'han realitzat en l'apartat 3.4.4. Recordem la formulació matemàtica:

$$\begin{pmatrix} e^{-j\varphi_o} & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-j\varphi_o} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

**Nota:** La matriu de Jones del modulador i el vector de Jones incident al modulador estan expressats prenent com a referència els eixos del cristall de Niobat de Liti.

El resultat és una polarització lineal horitzontal amb un cert desfasament que depèn de la potència de RF aplicada al modulador, dit d'una altra manera, depèn del valor que prengui  $n_o$ . És a dir, actua com a un modulador de fase.

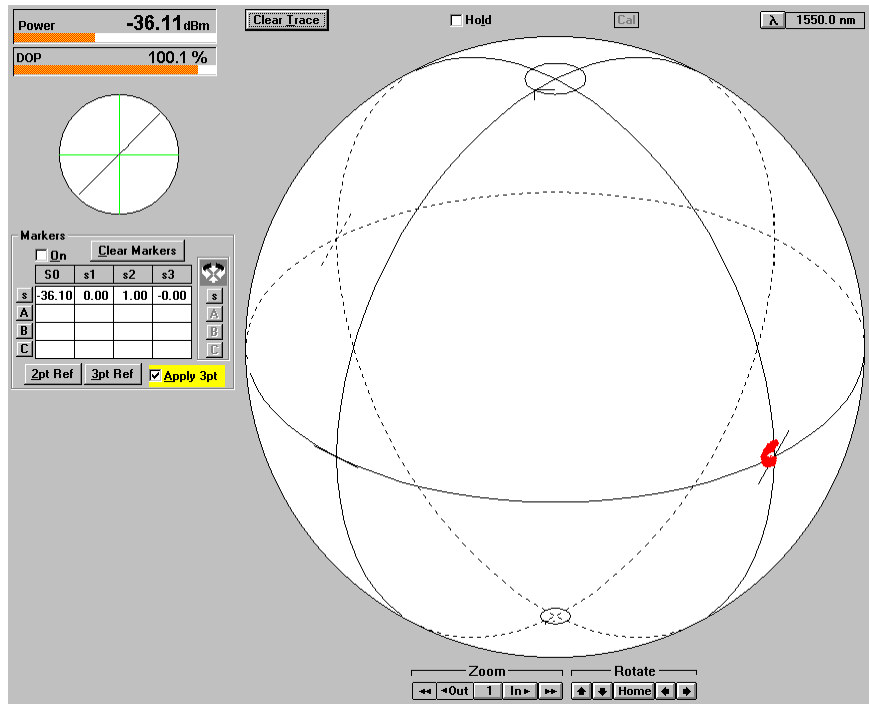


Fig. 4.10 Sortida del modulador per a un senyal òptic d'entrada amb polarització horitzontal i senyal elèctric quadrat a 0.5 Hz

En el cas d'introduir una polarització orientada a l'eix extraordinari del modulador obtenim el mateix resultat que en el cas anterior. És a dir, la polarització es manté. L'efecte que provoca l'aplicació del senyal elèctric és un desfasament que varia en funció de la potència d'aquest senyal i depèn del valor de  $n_e$ . Tal com dèiem en l'apartat 3.4.4 amb aquesta configuració no modulem en polarització si no en fase:

$$\begin{pmatrix} e^{-j\varphi_0} & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ e^{-j\varphi_e} \end{pmatrix} \tag{3.21}$$

**Nota:** La matriu de Jones del modulador i el vector de Jones incident al modulador estan expressats prenent com a referència els eixos del cristall de Niobat de Liti.



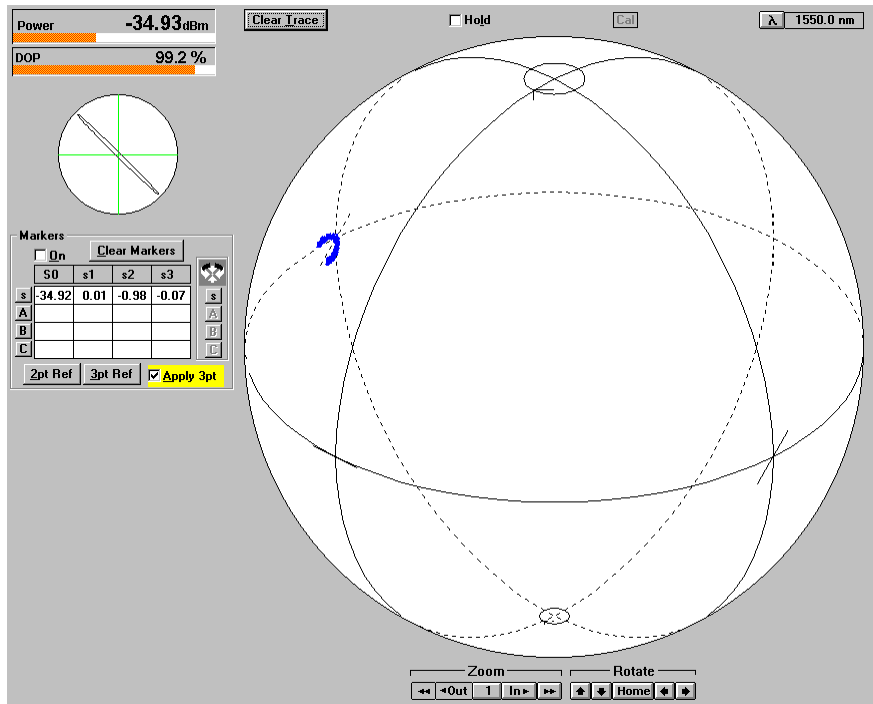


Fig. 4.11 Sortida del modulador per a un senyal òptic d'entrada amb polarització vertical i senyal elèctric sinusoidal a 0.5 Hz

- **Mesura 3**

Per últim volem veure què passa quan introduïm un senyal òptic amb la polarització qualsevol i un senyal elèctric sinusoidal de freqüència 0.5 Hz i amplitud  $V\pi$  al modulador.

El resultat és el de fig. 4.12. La polarització de sortida va variant però, en aquest cas, la modulació no és l'òptima. No tenim dues polaritzacions ortogonals com quan la polarització de la llum incident era lineal a  $45^\circ$  respecte als eixos del cristall.

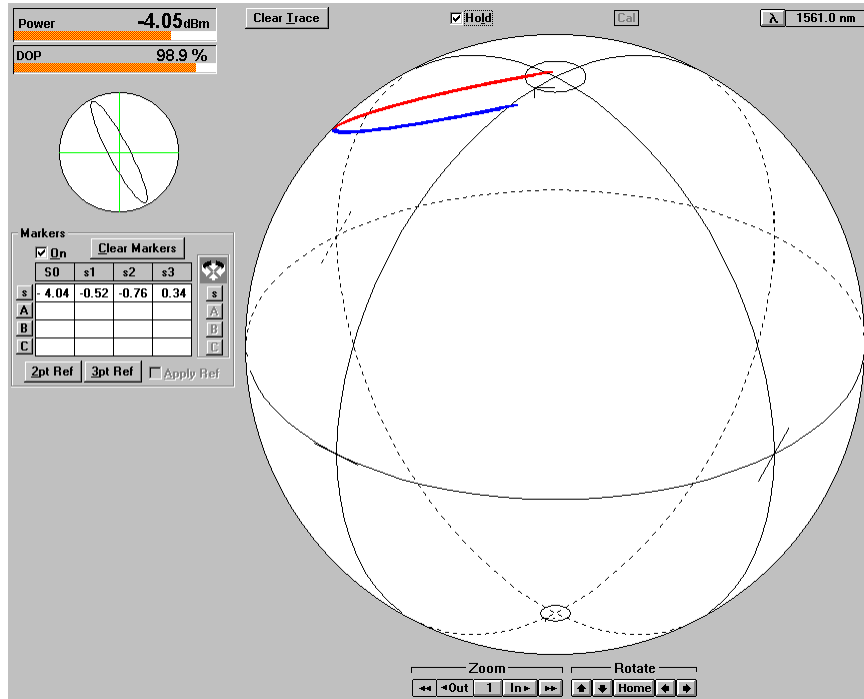


Fig. 4.12 Evolució del SOP de la llum del senyal de sortida del modulador per a un SOP incident no òptim i senyal de RF una sinusoide d'amplitud  $V\pi$

Podem concloure que la millor configuració per a modular en polarització amb el dispositiu que disposem és introduir un senyal òptic amb polarització lineal orientada  $45^\circ$  respecte als eixos del cristall de Niobat de Liti del modulador i, que podem utilitzar el modulador com a modulador de fase si hi introduïm un senyal òptic amb polarització lineal orientada amb els eixos del cristall ( $0^\circ$  o  $90^\circ$  respecte els eixos del modulador).

## 4.4. Comprovació del funcionament del modulador a freqüències de GHz

L'experiment consisteix en introduir al modulador una polarització lineal orientada a  $45^\circ$  respecte als eixos del cristall, d'aquesta manera, s'aconsegueix que el modulador actuï com a un modulador de polarització òptim. Aleshores, la llum es modula utilitzant una seqüència de dades fixa utilitzant un PRBS de 8 bits de longitud. La seqüència utilitzada per a la realització de l'experiment és "11001010" i la freqüència de modulació 1 GHz. La llum de sortida del modulador anirà canviant la seva polarització segons el bit que estigui modulant. En cas de modular el bit '0' el SOP de sortida serà el mateix que el d'entrada i en cas de modular el bit '1' el SOP de sortida canviarà en funció del

voltatge aplicat pel PRBS. Per exemple, si el voltatge aplicat és  $V\pi$  el SOP resultant serà l'ortogonal al d'entrada, polarització lineal a  $135^\circ$ .

Per a realitzar l'experiment s'utilitza aquest *set-up*:

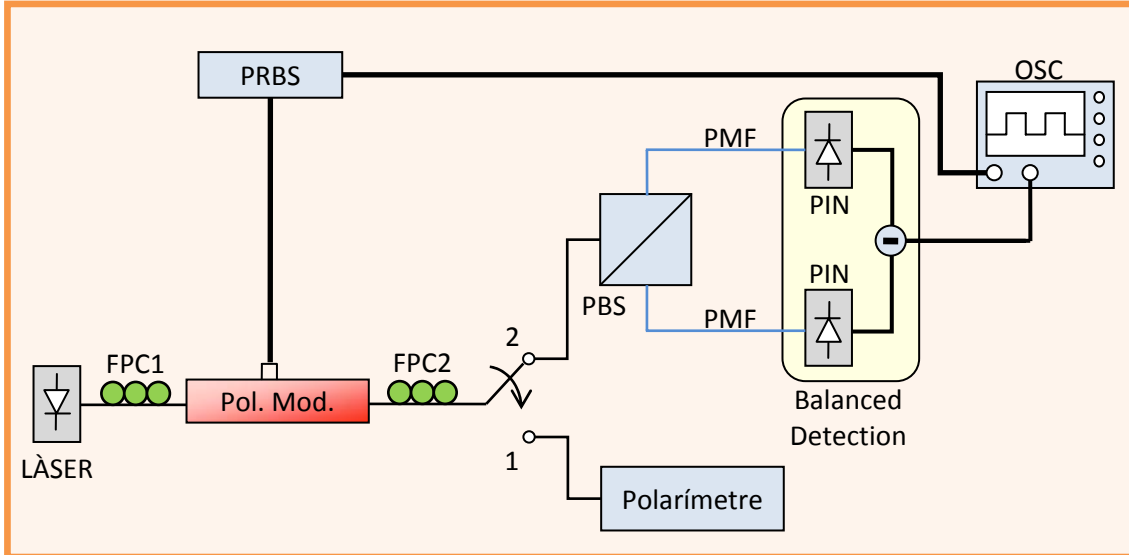


Fig. 4.13 *Set-up* de comprovació del funcionament del modulador de polarització

S'han de diferenciar dues parts en aquest circuit. Una part ens servirà per a controlar que la polarització d'entrada al modulador sigui l'adequada (polarització lineal orientada a  $45^\circ$  respecte els eixos del cristall) i l'altra per a fer la mesura amb l'oscil·loscopi.

Per a controlar la polarització d'entrada desconnectarem el PRBS i connectarem el polarímetre (posició 1 de la fig. 4.13) i utilitzarem el mateix mètode que s'ha utilitzat a l'apartat 4.3. Anirem manipulant el FPC1 fins a tenir la polarització d'entrada alineada a l'eix de la fibra. Per saber quan estarà alineada mourem la fibra d'entrada. Quan el SOP de sortida mesurat al polarímetre es mantingui estable amb els moviments de la fibra d'entrada, aleshores podrem afirmar que el SOP d'entrada està alineat correctament.

Després, connectarem el PRBS i el PBS (posició 2 de la fig. 4.13) i farem les mesures amb l'oscil·loscopi.

La fibra de sortida del modulador és no mantenidora de la polarització (SMF). Tal com s'ha explicat en l'apartat 3.4.4 quan una llum polaritzada es enviada a través d'una fibra òptica monomode estàndard, l'estat de polarització s'altera a causa de la birefringència del canal, però únicament causen una rotació rígida de la constel·lació de l'esfera de Poincaré, per tant la informació no es corromp, sempre que s'utilitzi una codificació diferencial.

La rotació que la fibra provoca es compensa amb el control de polarització FPC2. D'aquesta manera s'optimitza la recepció del senyal. La recepció serà òptima quan a la pantalla del oscil·loscopi observem màxima potència rebuda.

El PBS ens desmodula el senyal. Els fotodíodes detecten el senyal òptic i fan la conversió opto-elèctrica. A l'oscil·loscopi veurem en un canal el senyal de dades que ve directament des del PRBS i en l'altre, el senyal que retorna el fotoreceptor balancejat.

Els resultats els recuperem amb el port GPIB de l'oscil·loscopi utilitzant MatLab i es mostren a continuació:

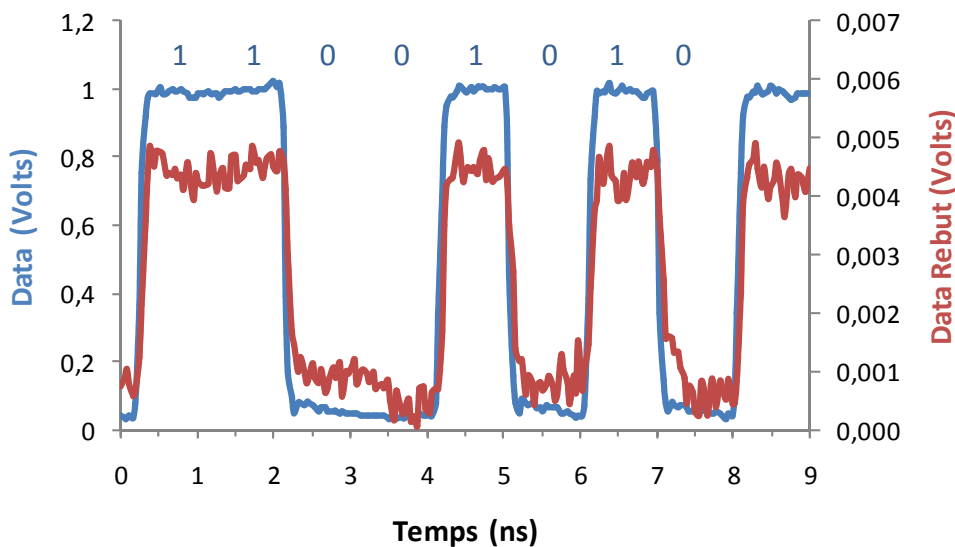


Fig. 4.14 Resposta del modulador quan introduïm una seqüència de bits a  $f = 1 \text{ GHz}$  i el senyal òptic està alineat a l'eix de la fibra d'entrada del modulador

Es veu a la gràfica que el senyal que s'ha modulad i desmodulat correspon al senyal de dades que el PRBS injecta al modulador. Per tant, podem afirmar que el modulador funciona correctament.

## 4.5. Mesura del voltatge de mitja ona ( $V\pi$ )

El valor de  $V\pi_{POLSK}$  és el voltatge que es requereix per a provocar una màxima variació de la polarització de la llum a la sortida del modulador (Veure apartat 3.4.4).

Amb el següent experiment es pretén caracteritzar el valor del voltatge de mitja ona en tot el rang de freqüències en què pot operar el modulador (de 0 Hz fins a 10 GHz).

El generador de funcions del laboratori no ens permet caracteritzar el valor de  $V\pi$  per a tot el rang de freqüències del modulador ja que aquest, no pot donar-nos suficient potència de sortida per arribar al valor corresponent a  $V\pi$  a mesura que augmenta la freqüència. Com veurem més endavant el generador ens permetrà caracteritzar el voltatge de mitja ona per a freqüències inferiors a 6,5 GHz.

Per poder realitzar les mesures fins a 6,5 GHz utilitzarem el següent circuit:

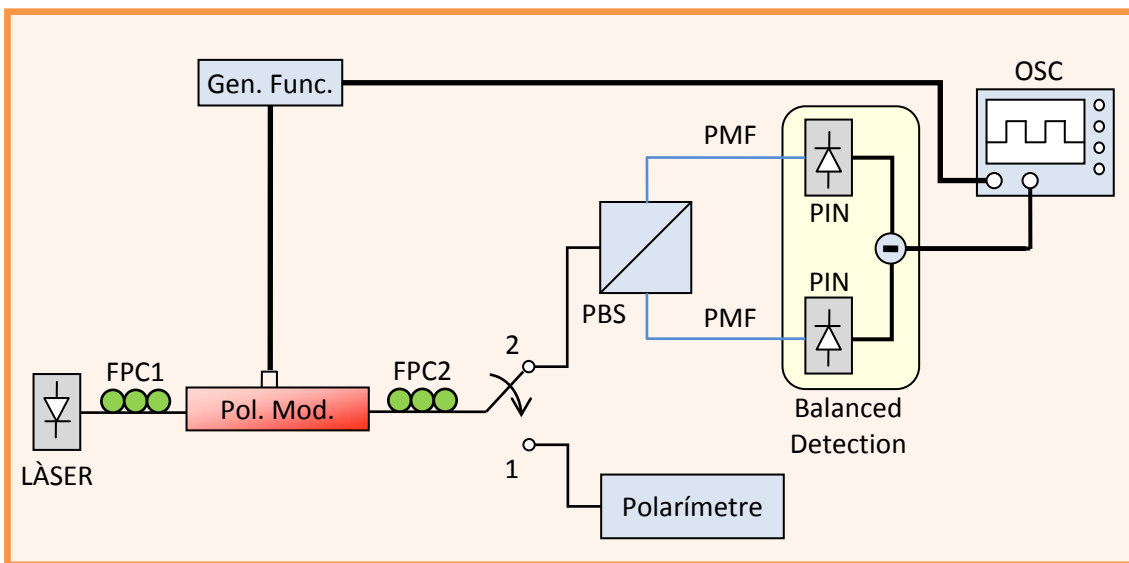


Fig. 4.15 Set-up per a mesurar el valor de  $V\pi$  del modulador de polarització

La clau de l'experiment rau en observar com varia el senyal detectat després de la modulació per a diferents potències de RF. El generador de funcions el configurarem per tal que injecti un senyal sinusoidal a la freqüència a la qual volem calcular el valor de  $V\pi$ . Aquest senyal modularà la llum que el làser introdueix al modulador.

El senyal modulat serà detectat pels fotodíodes tal com s'indica a la figura. I aquest s'observarà a l'oscil·loscopi.

Com hem exposat en apartats anteriors, per tal d'optimitzar la modulació, l'entrada del senyal òptic al cristall ha de tenir el SOP lineal a  $45^\circ$ . Si ho fem així es maximitza la distància entre els SOPs de la modulació. Per tant, quan la potència de RF correspongui amb el valor de  $V\pi$ , l'estat de polarització de sortida anirà commutant entre dos SOPs ortogonals (lineal a  $45^\circ$  i lineal a  $135^\circ$ ).

Per a optimitzar el SOP d'entrada utilitzarem, un altre cop, el mateix mètode que s'ha utilitzat en els experiments anteriors, on s'ha fet servir el FPC1 i el polarímetre.

Per a l'obtenció del valor de  $V\pi$  de forma experimental hem d'observar el senyal òptic modulad després de ser detectat pel fotodíode.

A fi d'optimitzar la recepció del senyal haurem de manipular el control de polarització de sortida del polaritzador per a obtenir màxima potència detectada. La potència rebuda serà màxima quan el modulador treballi a la potència que correspongui al voltatge de mitja ona a la freqüència de treball corresponent. Per tant, per saber quan ens trobem en el punt on estem modulant amb  $V\pi$  haurem d'anar variant la potència de RF i manipular el control de polarització simultàniament, fins a detectar potència màxima.

Què passarà si apliquem un voltatge major que el voltatge de mitja ona?. En aquest cas, quan el senyal sinusoidal sobrepassi el valor de  $V\pi$ , veurem a la pantalla de l'oscil·loscopi que el senyal sinusoidal rebut comença a deformar-se i, fins i tot, presentarà un desdoblament (inici i canvi de cicle del senyal sinusoidal). Quan l'amplitud del senyal modulant és major que el valor de  $V\pi$  el modulador actua tot començant un altre cicle de resposta.

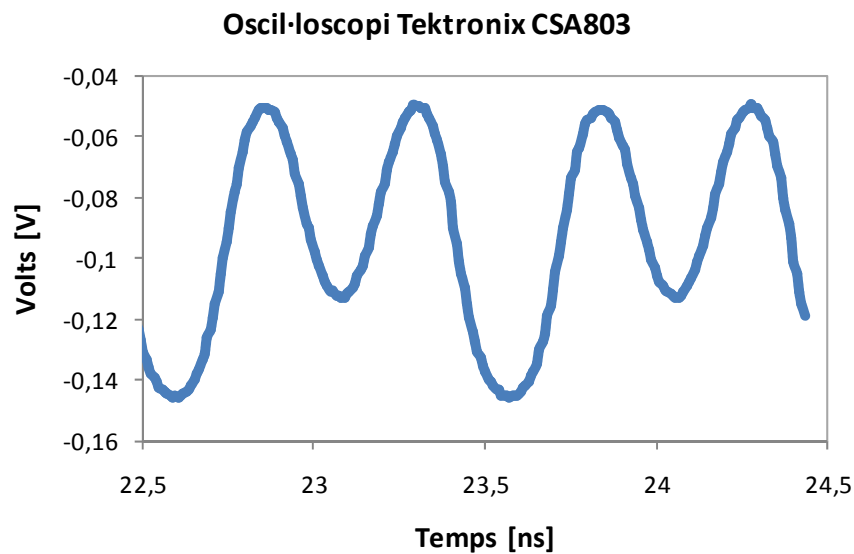


Fig. 4.16 Senyal detectat a l'oscil·loscopi quan s'aplica un senyal elèctric sinusoidal de voltatge major que  $V\pi$

Per tant, per trobar el valor de  $V\pi$  haurem d'anar modificant la potència de RF fins a obtenir el valor on el senyal detectat sigui màxim i la forma sinusoidal es mantingui.

Els resultats obtinguts són els següents:

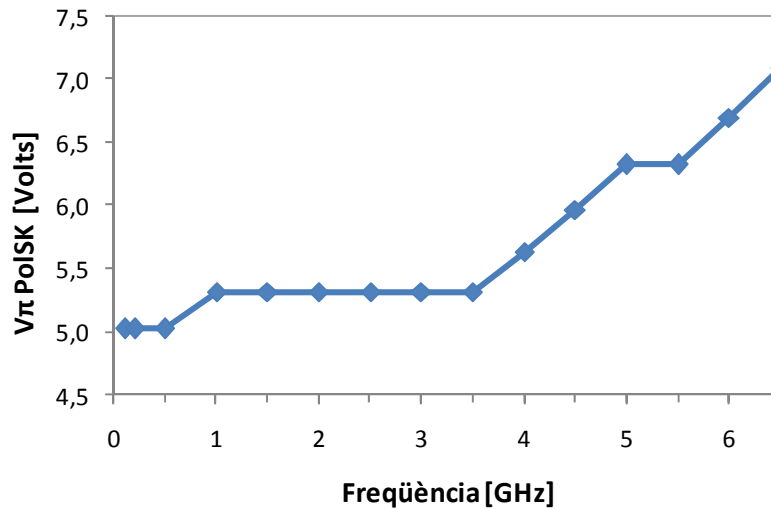


Fig. 4.17 Mesura del  $V_{\pi PolSK}$  del modulador en funció de la freqüència

Un cop calculat els valors de  $V_{\pi}$  per a les freqüències de 100 MHz fins a 6,5 GHz hem d'obtenir els valors de  $V_{\pi}$  per a tot el rang de freqüències en les que pot treballar el modulador.

Hem d'utilitzar un altre mètode per caracteritzar el valor del voltatge de mitja ona per a freqüències superiors a 6,5 GHz. El mètode que s'ha dissenyat per a fer-ho, consisteix en calcular la resposta en freqüència del modulador de polarització i a partir d'aquesta i els valors del voltatge de mitja ona que ja tenim, obtenir el valor de  $V_{\pi}$  en tot el rang d'operació del modulador.

Per a calcular la resposta en freqüència del modulador utilitzarem el següent circuit:

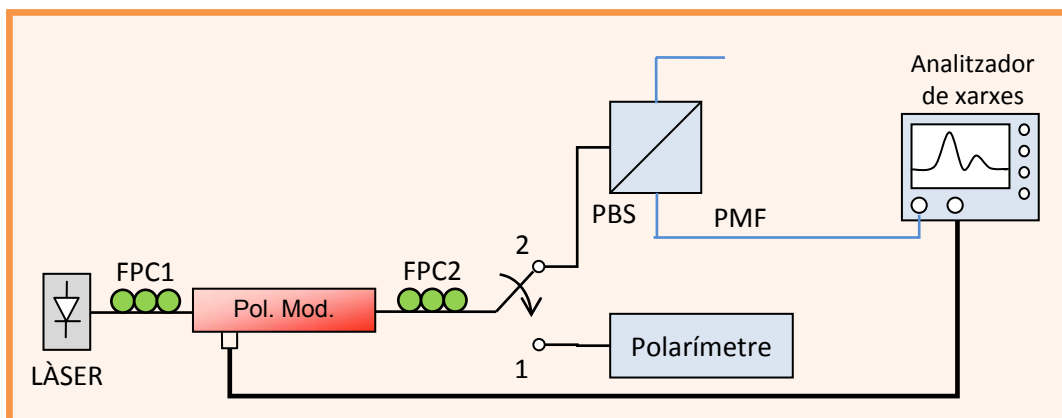


Fig. 4.18 Esquema de mesura de la resposta en freqüència del modulador de polarització

El procediment que s'ha de seguir és el mateix que en l'experiment anterior. En primer lloc, alineem la polarització amb el polarímetre i el FCP1, en segon lloc, connectem el PBS i l'analitzador. Després manipulant el FCP2 busquem que la resposta a l'analitzador tingui màxima potència.

Un cop està tot optimitzat, ja es pot realitzar la captura de la pantalla del analitzador de xarxes. El resultat obtingut és el següent:

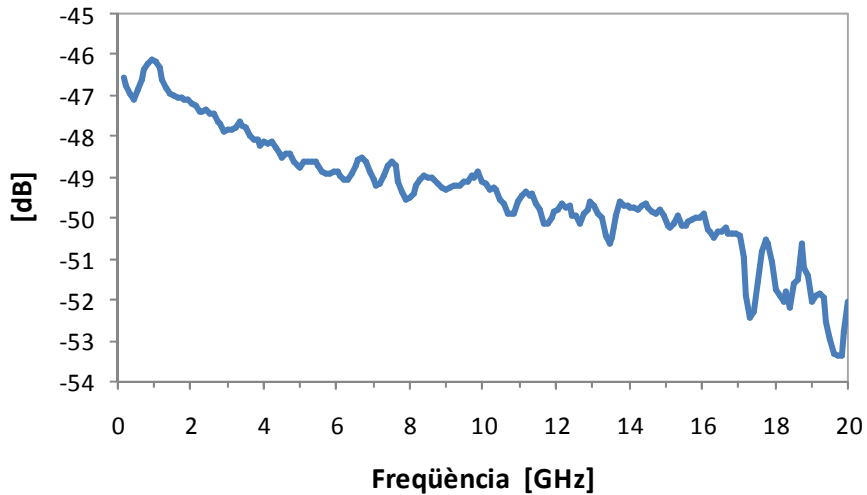


Fig. 4.19 Resposta en freqüència del modulador de polarització entre 0 i 20 GHz

Si invertim aquest senyal s'obté una mesura relativa de la potència elèctrica corresponent al voltatge de mitja ona.

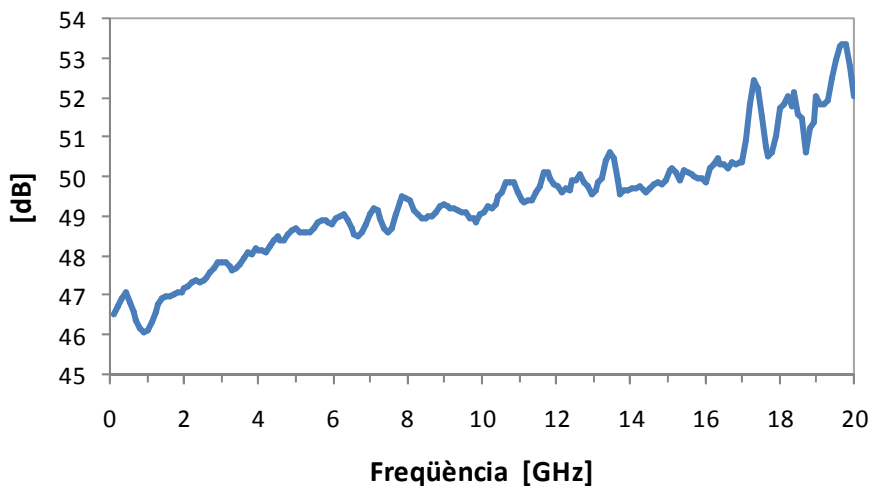


Fig. 4.20 Mesura relativa de la potència elèctrica corresponent al voltatge de mitja ona

Per extrapolar els resultats, agafem el valor de  $V_{\pi}$  a qualsevol freqüència de les que ja tenim calculades de l'experiment anterior (s'escull la  $f = 2GHz$  on el



valor de  $V_{\pi} = 5.32$  V, i per tant la  $P_{RF} = 18.5$  dBm). I després, desplaçem verticalment la corba de la figura anterior per a tenir a la freqüència igual a 2 GHz una potència de RF de 18.5 dBm.

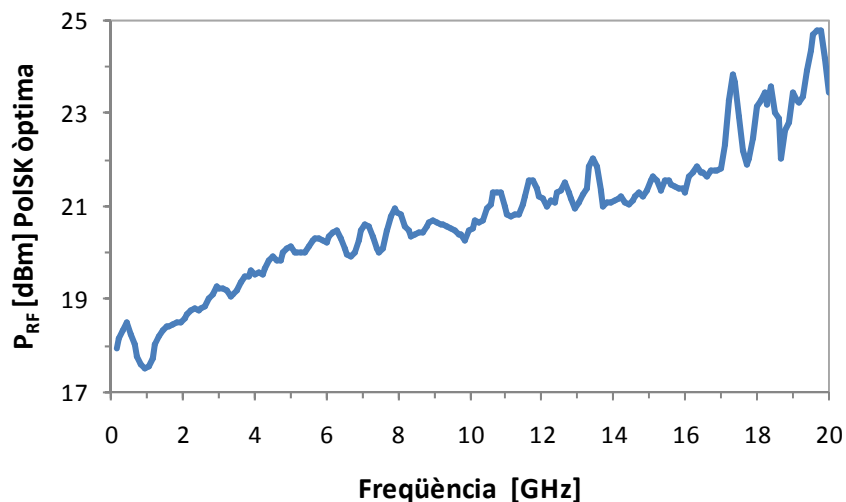


Fig. 4.21 Valor de la potència elèctrica necessària per a provocar màxima variació del SOP de sortida del modulador en funció de la freqüència

Aquest resultat el passem a volts per a obtenir el valor del voltatge de mitja ona i el representem a la gràfica següent. A més a més, hi superposem els resultats que s'han obtingut en l'experiment anterior:

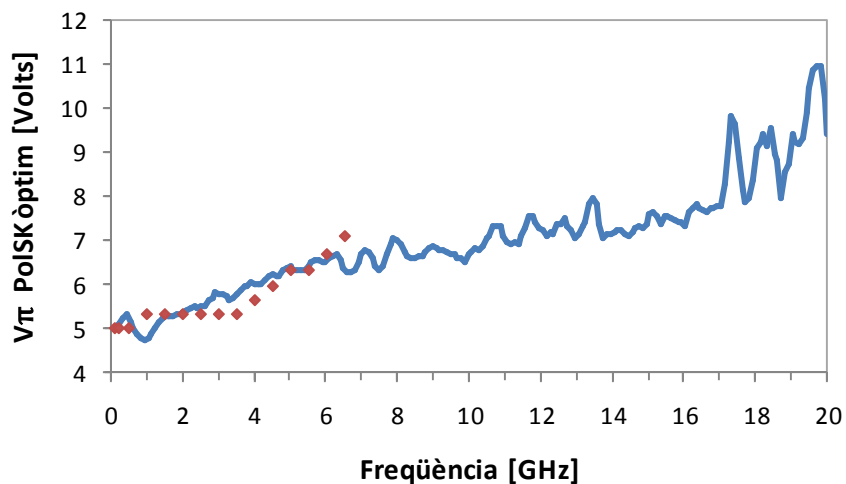


Fig. 4.22 Voltatge de mitja ona de la modulació PolSK òptima en funció de la freqüència des de 0 fins a 20 GHz

Es pot veure a la gràfica que els valors del voltatge de mitja ona calculats mitjançant l'oscil·loscopi coincideixen amb força exactitud amb els valors calculats utilitzant la resposta freqüencial del modulador mesurada amb

l'analitzador de xarxes. Per veure-ho millor podem fer una ampliació de la gràfica anterior, observant només els valors de  $V\pi$  per al rang de freqüències comprés entre 0 i 6.5 GHz.

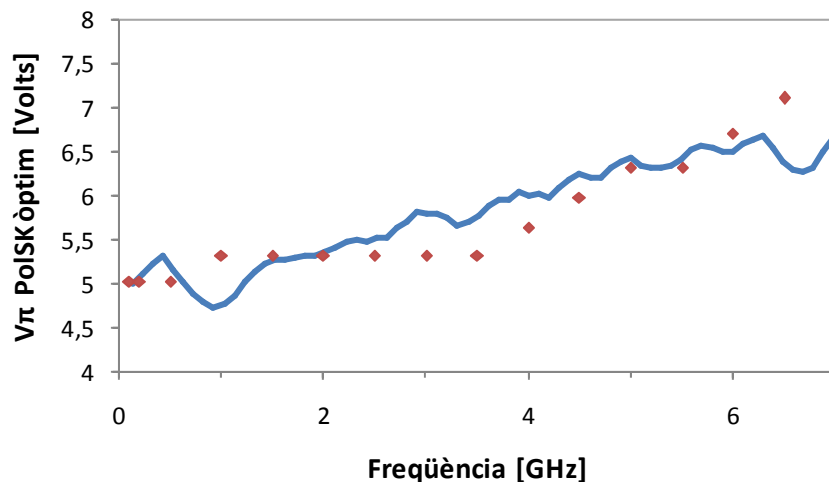


Fig. 4.23 Comparació dels valors del voltatge de mitja ona per a la modulació PolSK òptima ( $V\pi_{PolSK}$ ) calculats mitjançant els esquemes de la fig. 4.15 i la fig. 4.18

## 4.6. Ús del modulador de polarització com a modulador de fase.

Tal com s'ha explicat anteriorment, podem utilitzar el modulador de polarització com a modulador de fase. Per fer-ho s'ha d'injectar un raig de llum al modulador amb una SOP lineal horitzontal (alineat amb l'eix ordinari del cristall de Niobat de Liti) o vertical (alineat amb l'eix extraordinari).

El que es pretén caracteritzar amb aquest experiment és el voltatge de mitja ona o  $V\pi_{PSK}$  de la modulació de fase en els eixos ordinari i extraordinari. Per tant, haurem de mesurar quina potència de RF necessitem per a produir un salt de fase de  $180^\circ$  a la sortida del modulador. Això ho haurem de fer tant per l'eix ordinari com per l'extraordinari.

Per mesurar el *half-wave voltage* ho farem mitjançant l'anàlisi de l'espectre òptic del senyal detectat a la sortida del modulador.

Aplicarem un senyal sinusoidal a la entrada de RF del modulador d'amplitud  $V_z$  i pulsació  $\Omega$ .

L'espectre del senyal l'obtidrem amb el següent esquema:

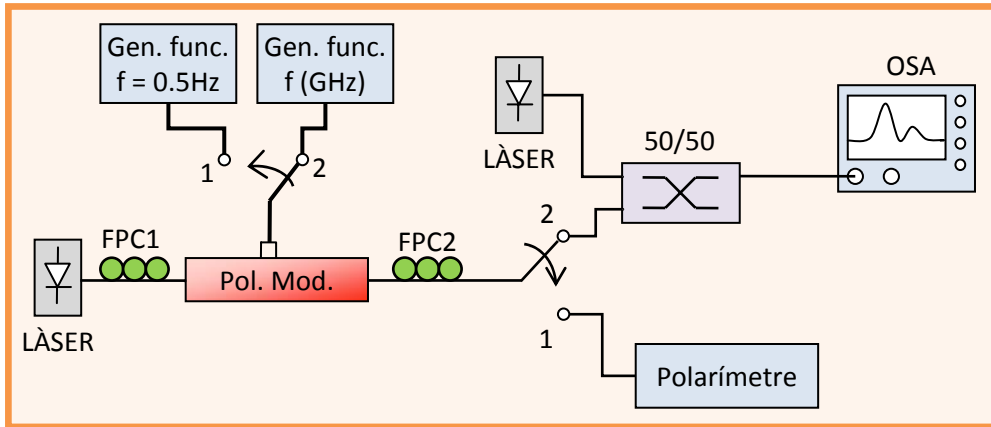


Fig. 4.24 Set-up de mesura del  $V_{\pi}$  del PSK mitjançant les funcions de Bessel

Per a alinear la polarització d'entrada adequadament s'utilitzarà el mateix mètode que s'ha utilitzat en l'apartat 4.3. Utilitzarem un generador de funcions de baixa freqüència, un FPC i el polarímetre tal com mostra la figura anterior (posició 1 dels commutadors).

Amb el generador configurat amb un senyal sinusoidal d'amplitud 6 V i freqüència 0.5 Hz s'anirà manipulant el FPC1 fins aconseguir que l'estat de polarització vist en el polarímetre no canviï. Quan això sigui així, l'estat de polarització d'entrada al modulador estarà orientat a un dels eixos del cristall del modulador i per tant, s'estarà modulant en fase.

El desfasament obtingut a la sortida del modulador serà:

$$\phi(t) = kV_z M(\Omega) \cos(\Omega t - \Psi) \tag{4.1}$$

on:

$$k = \frac{\pi}{\lambda G} n_e^3 r_{33} \eta L \quad i \quad M(\Omega) = e^{-\left(\frac{\alpha L}{2}\right)} \left[ \frac{\sinh^2\left(\frac{\alpha L}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{\xi L}{2}\right)}{\left(\frac{\alpha L}{2}\right)^2 + \left(\frac{\xi L}{2}\right)^2} \right]^{1/2} \tag{4.2}$$

Podem definir els voltatges de mitja ona d'un modulador de fase en l'eix ordinari i en l'eix extraordinari, respectivament com:

$$V_{\pi_o}(\Omega) = \frac{\lambda G}{n_0^3 r_{13} \eta L M(\Omega)} \quad \text{Per a l'eix ordinari} \tag{4.3}$$

$$V_{\pi_e}(\Omega) = \frac{\lambda G}{n_e^3 r_{33} \eta LM(\Omega)} \quad \text{Per a l'eix extraordinari}$$

La mesura de la tensió de mitja ona a qualsevol freqüència desitjada pot ser feta amb l'anàlisi espectral, a través de l'escaneig amb un interferòmetre de Fabry-Perot actuant com una analitzador d'espectre òptic d'alta resolució.

L'expressió del camp elèctric a la sortida del modulador de fase per a una freqüència de RF fixada i potència constant és:

$$E(t) = E_0 e^{j\omega t} e^{-j\gamma \cos \Omega t} \quad (4.4)$$

$E_0$  és l'amplitud del senyal òptic,  $\omega$  és la pulsació òptica i  $\gamma$  es defineix com l'índex de modulació.

$$\gamma = \kappa V_z M(\Omega) \quad (4.5)$$

Si fem una descomposició espectral del senyal mitjançant les funcions de Bessel obtenim:

$$\frac{E(t)}{E_0} = e^{j\omega t} \left[ J_0(\gamma) + 2 \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^p J_{2p}(\gamma) \cos(2p\Omega t) + 2j \sum_{p'=1}^{\infty} (-1)^{p'} J_{2p'-1}(\gamma) \cos((2p'-1)\Omega t) \right] \quad (4.6)$$

L'espectre del senyal modulad té varies línies centrades al voltant de la pulsació òptica  $\omega$ . Cada línia està separada  $\Omega$  de les línies veïnes. Del senyal detectat pel fotodetector a la sortida del interferòmetre de Fabry-Perot tenim que l'amplitud de la línia central és  $J_0(\gamma)^2$  i l'amplitud de les dues línies laterals són  $J_1(\gamma)^2$ .

Observem l'evolució dels dos primers ordres de les funcions de Bessel:

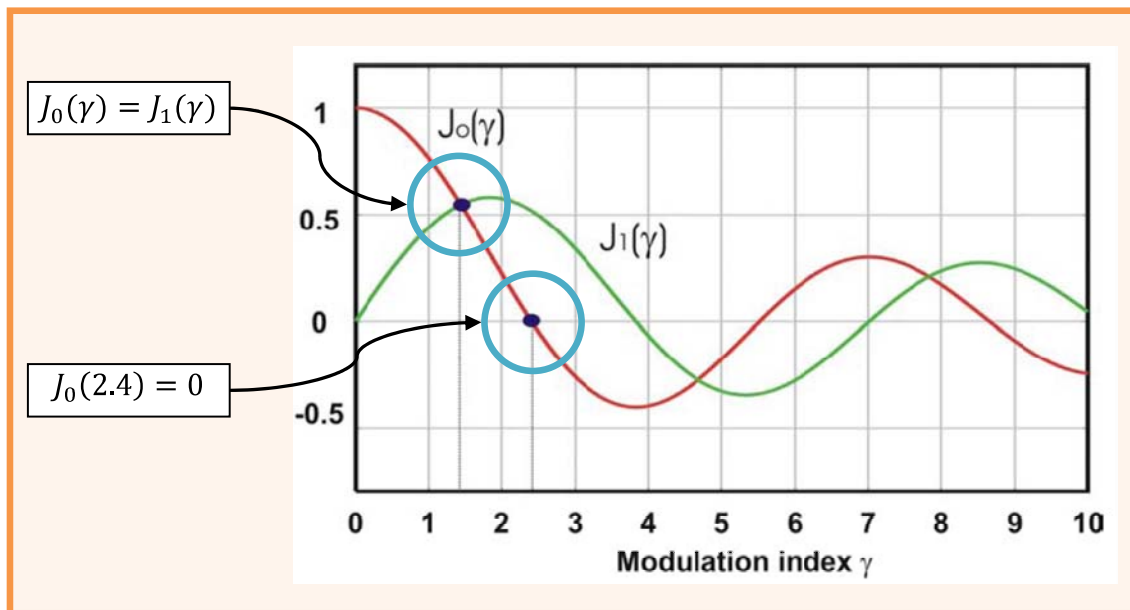


Fig. 4.25 Representació gràfica dels dos primers ordres de les funcions de Bessel

Els dos punts ressaltats a la fig. 4.25 són dos punts característics de les funcions de Bessel que ens permetran calcular el valor de  $V_{\pi}$ . Els dos punts remarcats corresponen a les següents situacions:

- $J_0(\gamma) = J_1(\gamma)$
- $J_0(2.4) = 0$

Les representacions gràfiques de l'espectre del senyal modulad en fase per aquestes dues situacions seran les següents:

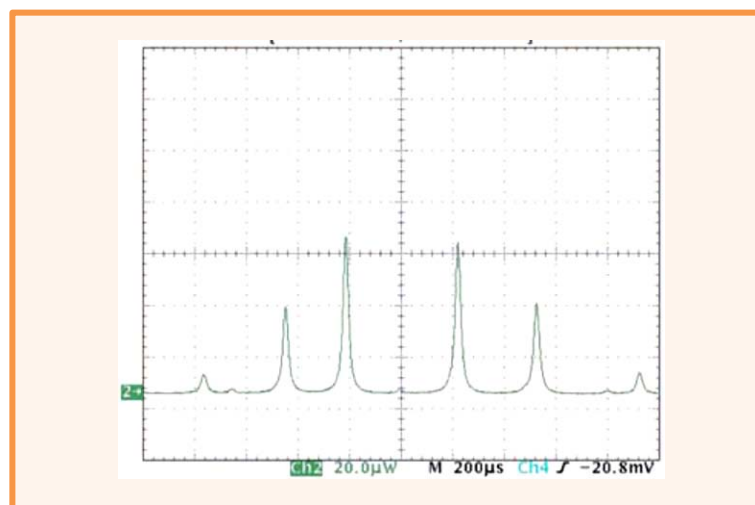


Fig. 4.26 Espectre d'un senyal modulad en fase. Punt on el valor de  $J_0 = 0 \Rightarrow \gamma = 2.4$

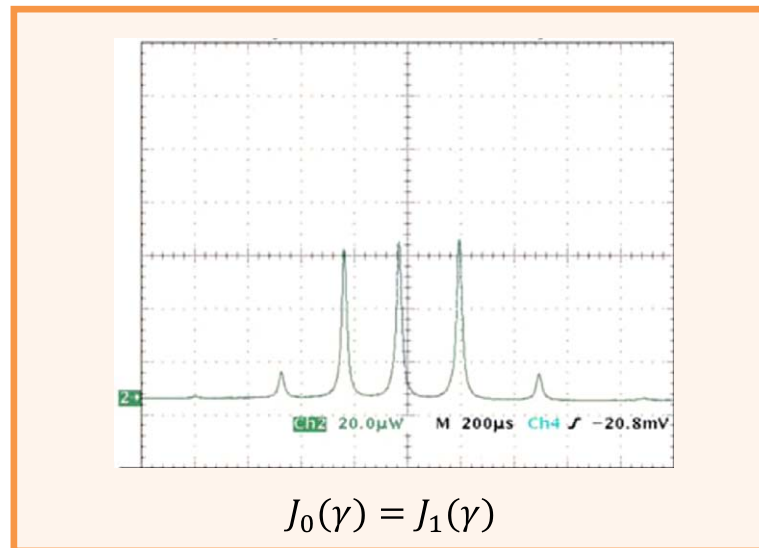


Fig. 4.27 Espectre d'un senyal modulad en fase. Punt on el  $J_0 = J_1 \Rightarrow \gamma = 1.435$

Podem aprofitar aquesta propietat per a calcular acuradament el voltatge de mitja ona a la freqüència que nosaltres desitgem.

Agafant les equacions (4.2), (4.3) i (4.5) i combinant-les obtenim la següent expressió:

$$V_{\pi}(\Omega) = \frac{\pi}{\gamma} V_z \quad (4.7)$$

Nota: El valor de  $V_{\pi}$  be donant en volts de pic a pic i el valor de  $V_z$  és l'amplitud del senyal sinusoidal d'entrada en volts de pic.

Per a poder extreure el valor de  $V_{\pi}$  de l'equació (4.7) només cal que calculem el valor de  $V_z$  per a un dels dos casos anteriors on l'índex de modulació  $\gamma$  és conegut. (43)

Per a realitzar les mesures s'ha escollit el cas on  $J_0(\gamma) = J_1(\gamma)$  per a  $\gamma = 1.435$ . Per augmentar la precisió no només es tindrà en compte la  $J_0$  i la  $J_1$ . També es tindran en compte els valors de la  $J_2$  i la  $J_3$  quan  $\gamma = 1.435$ .

De les funcions de Bessel es té que:

- $J_0(1.435) = 0.548$
- $J_1(1.435) = 0.548$
- $J_2(1.435) = 0.216$
- $J_3(1.435) = 0.054$

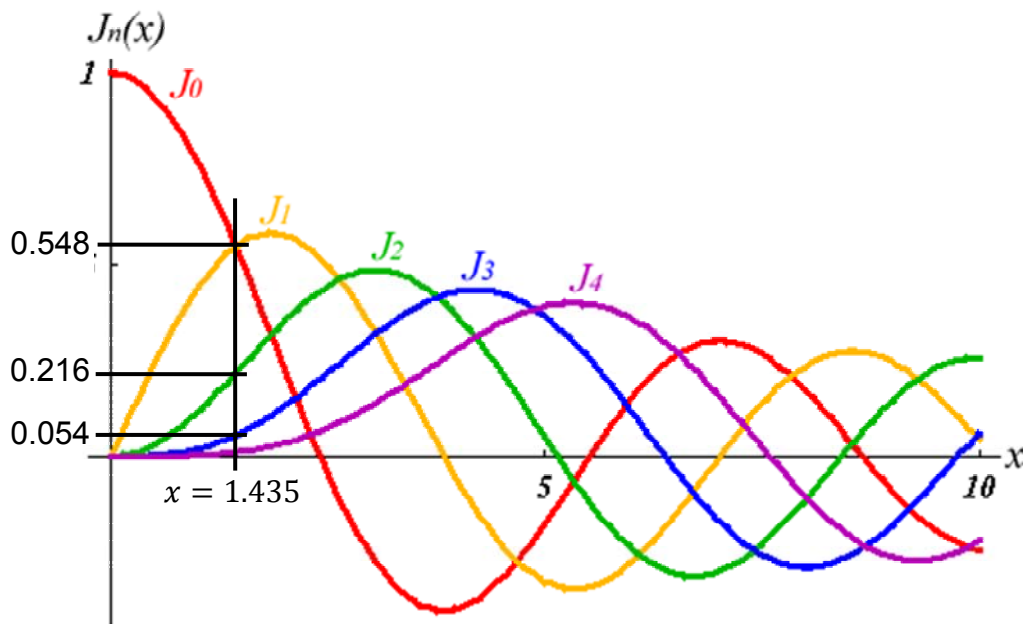


Fig. 4.28 Funcions de Bessel. Valors per a  $\gamma = 1.435$

Per tant per a  $\gamma = 1.435$  tindrem:

- $J_0 = J_1$
- $\frac{J_0}{J_2} = 2.537 \Rightarrow J_0(\text{dBm}) - J_2(\text{dBm}) = 4.04 \text{ dB}$
- $\frac{J_0}{J_3} = 10.14 \Rightarrow J_0(\text{dBm}) - J_3(\text{dBm}) = 10.06 \text{ dB}$

El procediment seguit per a fer les mesures serà el següent:

- Primer alineem la polarització mitjançant el polarímetre i el FPC1 (posició 1 del set-up de la fig. 4.24)
- Un cop alineada la polarització, connectarem el generador de funcions amb freqüències del rang de 0,1 GHz fins a 4 GHz i l'analitzador d'espectres òptics (posició 2 del set-up de la fig. 4.24)
- Seleccionem la freqüència de modulació a què volem realitzar la mesura
- Variem la  $P_{\text{RF}}$  fins a trobar el punt on  $\gamma = 1.435$ . Això serà així quan es compleixi que  $J_0 = J_1$ ,  $J_0 - J_2 = 4.04 \text{ dB}$  i  $J_0 - J_3 = 10.06 \text{ dB}$
- Calcularem el valor de  $V_{\pi}$  a partir del valor de la  $P_{\text{RF}}$  utilitzant la fórmula (4.7)

Per entendre millor aquest procediment, a continuació es mostra l'espectre òptic vist a l'OSA per a la  $f_{\text{mod}} = 2 \text{ GHz}$  i per a la polarització d'entrada orientada segons l'eix extraordinari.

En ell podem veure que  $J_0 \approx J_1$ ,  $J_0 - J_2 = 4.14 \text{ dB}$  i  $J_0 - J_3 = 10.02 \text{ dB}$  per a un valor de la potència elèctrica de 17,5 dBm.

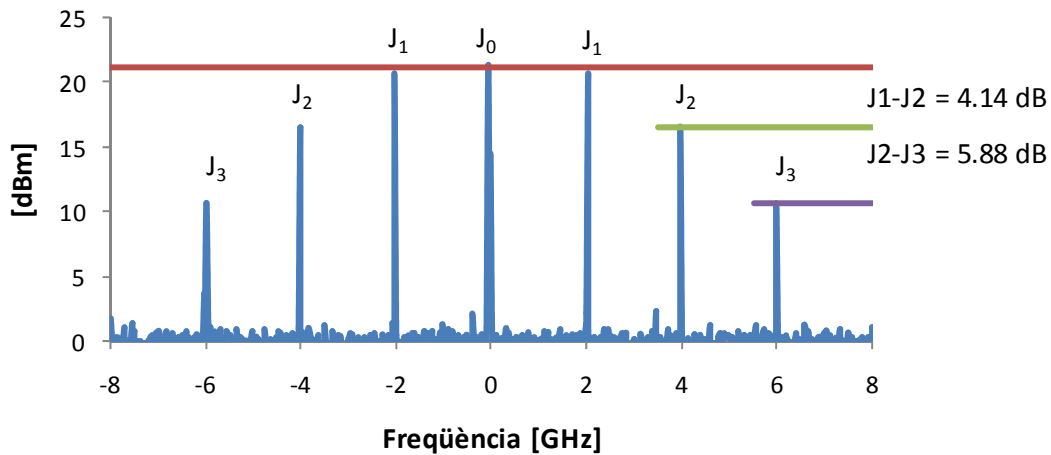


Fig 4.29 Espectre òptic d'un senyal òptic modulats en fase a una freqüència de 2 GHz i  $P_{RF}$  tal que  $J_0 = J_1$ .

Amb el valor de la potència elèctrica calculem el valor de  $V_{\pi_e}$  per a la freqüència de 2 GHz. Això ho farem mitjançant la fórmula (4.7):

$$V_{\pi_e} (\Omega) = \frac{\pi}{\gamma} V_Z; \quad \text{on} \quad V_Z = 2.37 \text{ V} \quad (P_{RF} = 17.5 \text{ dBm})$$

Per tant el valor de  $V_{\pi_e}$  per a  $f = 2 \text{ GHz}$  serà:

$$V_{\pi_e} (2 \text{ GHz}) = \frac{\pi}{1.435} 2.37 = 5.2 \text{ V}$$

Ara que ja sabem quin procediment s'ha de seguir, hem de realitzar l'experiment per a les dues possibles configuracions del modulador. En primer lloc, realitzem les mesures per a l'eix extraordinari i seguidament, fem les mesures per a l'eix ordinari.

#### 4.6.1. Mesura del $V_{\pi_e}$ del modulador

Els valors del voltatge de mitja ona del modulador configurat com a PSK per a l'eix extraordinari ( $V_{\pi_e}$ ) i per al rang de freqüències de 0 a 4 GHz calculat utilitzant les funcions de Bessel són els següents:



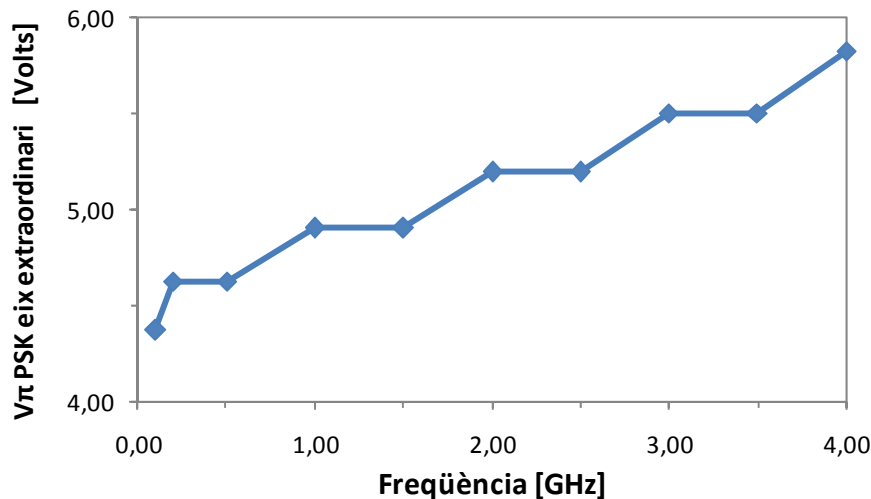


Fig. 4.30 Valor de  $V_{\pi}$  en funció de la freqüència del modulador actuant com a modulador de fase en l'eix extraordinari

Utilitzant el mètode de les funcions de Bessel només podem caracteritzar el valor del voltatge de mitja ona per a freqüències inferiors a 4 GHz, ja que el *span* màxim de l'OSA del laboratori és 20 GHz i no ens permet veure les components de l'espectre necessàries per al càlcul del  $V_{\pi}$ . Per a freqüències més grans es necessitaria un analitzador d'espectres òptics amb major ample de banda.

Com que no disposem d'un OSA amb major ample de banda hem d'utilitzar un altre mètode per tal de caracteritzar el modulador de polarització funcionant com a modulador de fase a freqüències superiors a 4 GHz.

El mètode que s'ha dissenyat per a fer-ho, consisteix en calcular la resposta en freqüència del modulador quan el senyal òptic d'entrada té una polarització lineal orientada a l'eix extraordinari del cristall, i a partir d'aquesta i dels valors del voltatge de mitja ona que ja tenim, obtenir el valor de  $V_{\pi}$  en tot el rang d'operació del modulador.

És pot demostrar que una modulació de fase pot ser expressada com a una modulació de freqüència. De fet, la relació entre la freqüència i la fase és la derivada respecte al temps:

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{\delta\Phi}{\delta t} \quad (4.8)$$

Podem utilitzar un filtre pas banda (BPF) com el de la fig. 4.31 per a calcular la resposta en freqüència del modulador. Hem de centrar el senyal modulat a la banda de transició del filtre. El senyal de FM, que està a la entrada del filtre, serà amplificat (o atenuat) per diferents factors en funció de la freqüència que

entri. Com més alta sigui la freqüència, major és l'amplitud del senyal de sortida del filtre.

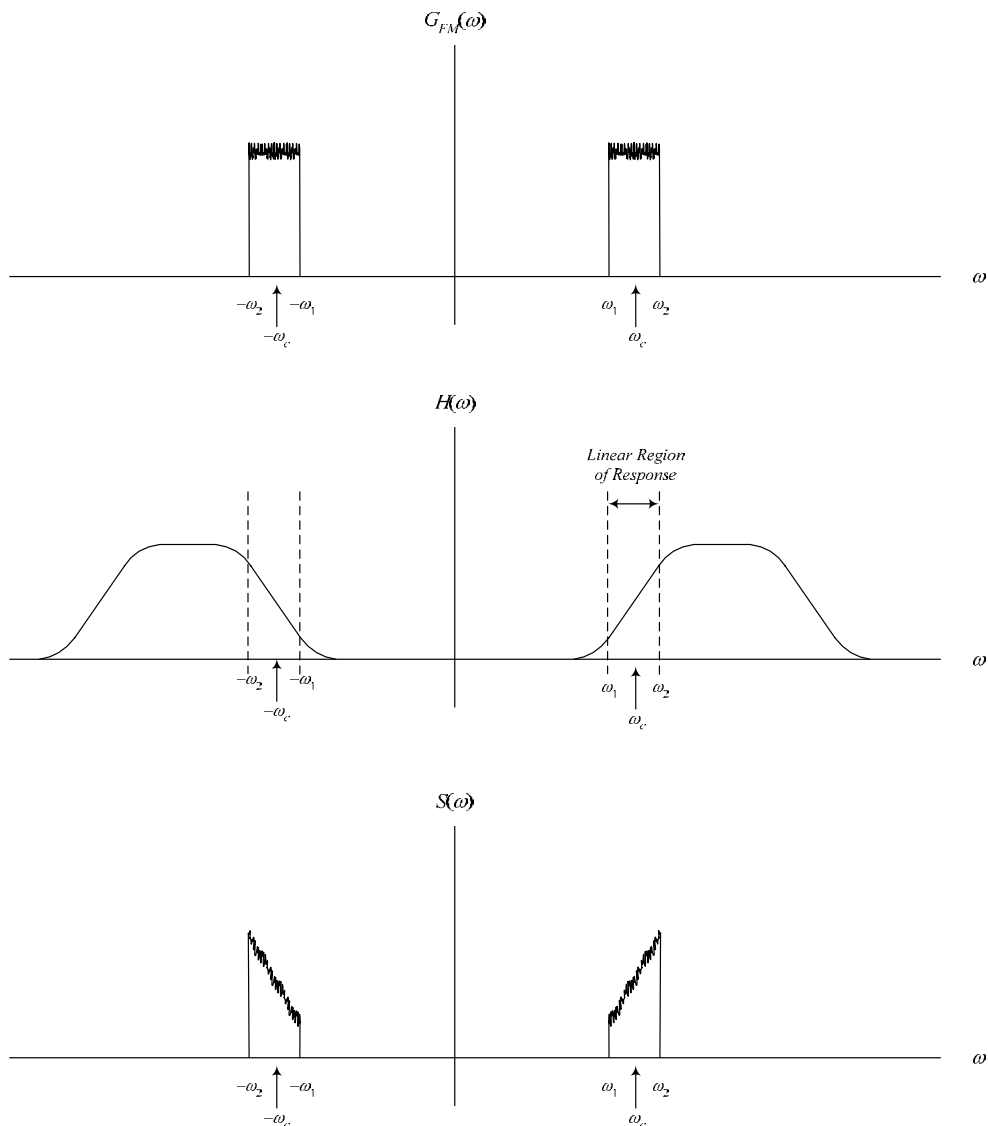


Fig. 4.31 Conversió PM  $\rightarrow$  IM mitjançant un BPF

D'aquesta manera podem convertir una variació de la freqüència (o variació de la fase) en una variació d'intensitat. Si hi afegim un fotodetector obtindrem un senyal elèctric que podem analitzar amb un analitzador de xarxa. Amb l'anàlisi d'aquest senyal podem obtenir la resposta en freqüència del modulador i, a partir d'aquesta, el valor de  $V_\pi$  en tot el rang de freqüències (entre 0 i 20 GHz) (44).

L'esquema que s'utilitzarà serà el següent:

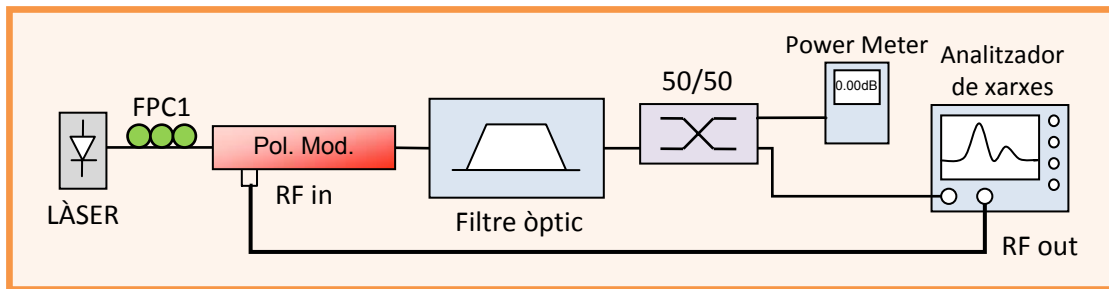


Fig. 4.32 Esquema per a calcular la resposta freqüencial del modulador per a potència elèctrica constant

Farem un escombrat de freqüència per tot el rang del modulador amb potència elèctrica d'entrada constant i en petita senyal. A l'analitzador s'observaran les variacions relatives de fase que introduirà el modulador com a variacions d'amplitud per a totes les freqüències.

Per a realitzar aquesta mesura el procediment que s'ha de seguir és el següent. En primer lloc, hem d'alinejar la polarització de la mateixa manera que hem fet en els experiments anteriors, utilitzant el polarímetre, el FPC1 i el generador de funcions, a l'eix extraordinari del cristall. Després hem de calibrar l'analitzador de xarxes i muntar el circuit tal com mostra la fig. 4.32. Un cop realitzat el muntatge, hem de sintonitzar el filtre per a detectar màxima potència al *power meter*. Això significarà que estem situats a la banda de pas. Després buscarem el punt on la potència és 3 dB inferior, d'aquesta manera estarem treballant a la banda de transició del filtre.

Llavors, hem de fer un escombrat en freqüència amb l'analitzador de xarxes des de 0 fins a 20 GHz.

El resultat obtingut per a l'eix extraordinari és:

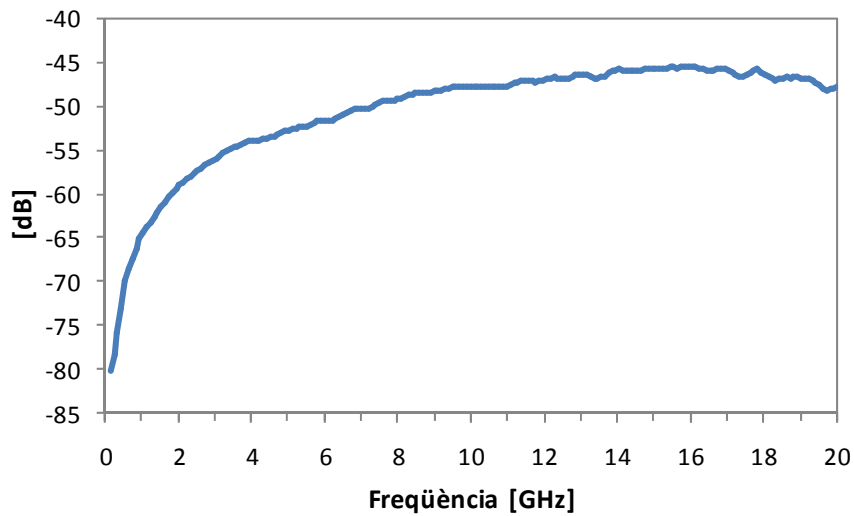


Fig. 4.33 Resposta en freqüència del modulador entre 0 i 20 GHz obtinguda amb la conversió FM-IM per a senyal òptic d'entrada alineat a l'eix extraordinari

Ara hem de calcular el valor de  $V_{\pi_e}$ :

Anem a analitzar matemàticament quin senyal hem obtingut de l'analitzador de xarxes.

Calculem quin seria el resultat quan introduïm un to a freqüència  $f_c$ :

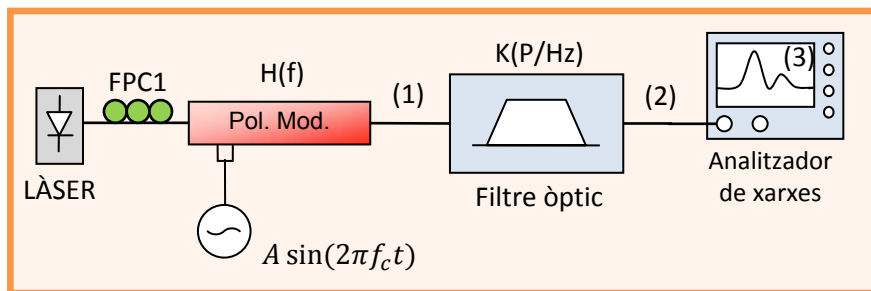


Fig. 4.34 Esquema simplificat per a l'anàlisi matemàtica del set-up de la fig. 4.32

Si modulem amb un to sinusoidal a la sortida del modulador (1) la fase del senyal òptic serà la següent:

(1) Fase:  $H(f_c) \cdot A \sin(2\pi f_c t)$

Com ja s'ha comentat, es pot demostrar que una modulació de fase pot ser expressada com a una modulació de freqüència. De fet, la relació entre la freqüència i la fase és la derivada respecte al temps:

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{\delta\Phi}{\delta t} \quad (4.8)$$

Per tant, en el punt (1) podem expressar les variacions de fase com a variacions de freqüència:

$$(1) \text{ Freqüència: } f_c \cdot H(f)|_{f=f_c} \cdot A \cos(2\pi f_c t)$$

Per tant, a la sortida del filtre (2) s'obté:

$$(2) k \cdot f_c \cdot H(f)|_{f=f_c} \cdot A \cos(2\pi f_c t)$$

L'analitzador farà una conversió opto-elèctrica amb un fotodíode. El senyal que s'observarà a la pantalla de l'analitzador serà:

$$(3) k \cdot f_c \cdot H(f)|_{f=f_c}$$

On  $k$  és la pendent de la banda de pas del filtre sintonitzable,  $f_c$  la freqüència a la qual es fa la mesura i  $H(f)$  la resposta del modulador.

Si volem obtenir la resposta  $H(f)$  del modulador haurem de calcular-la de la següent manera:

$$H(f)|_{f=f_c} = \text{dB}_{\text{Mesurats a AX}} - \text{dB}(f_c) - k(\text{dB})$$

Amb això obtindrem una mesura relativa del valor de  $V\pi$ . La fig. 4.35 mostra el resultat de fer la operació  $H(f)|_{f=f_c} = \text{dB}_{\text{Mesurats a AX}} - \text{dB}(f_c)$  per a totes les freqüències. Combinant el resultat d'aquest experiment amb els valors de l'experiment anterior obtindrem els valors dels voltatges de mitja ona per a totes les freqüències possibles.

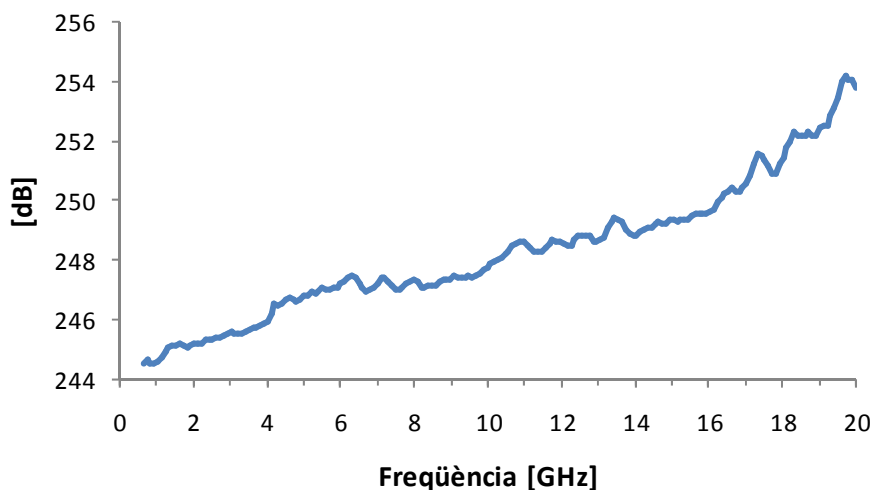


Fig. 4.35  $H(f_c)$  del modulador per a l'eix extraordinari

Per extrapolar els resultats, agafem el valor de  $V_{\pi_e}$  a qualsevol freqüència de les que ja tenim calculades de l'experiment anterior (s'escull la  $f = 1 \text{ GHz}$  on el valor de  $V_{\pi_e} = 4.85 \text{ V}$ , i per tant,  $P_{RF} = 17.7 \text{ dBm}$ ). I després, desplaçem verticalment la corba de la figura anterior per a tenir a la freqüència igual a  $1 \text{ GHz}$  una potència de RF de  $17.7 \text{ dBm}$ .

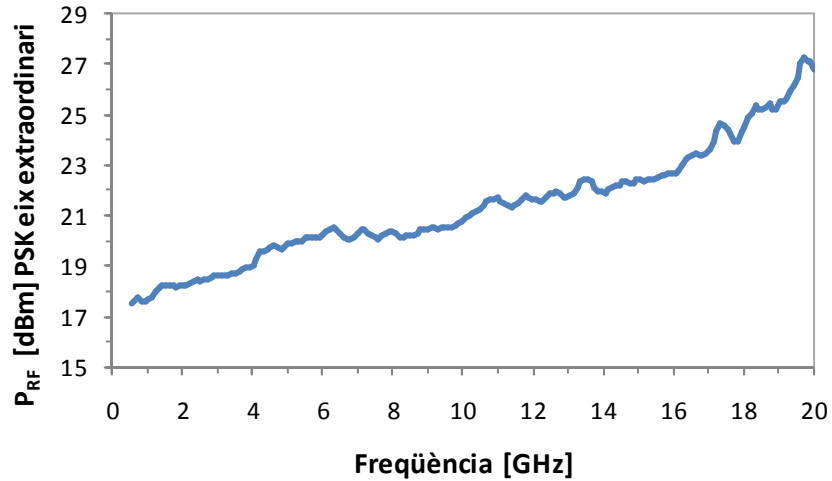


Fig. 4.36  $P_{RF}$  necessària per a provocar un desfasament de  $\pi$  per un senyal òptic d'entrada alineada a l'eix extraordinari del modulador

Aquest resultat el passem a volts per a obtenir el valor del voltatge de mitja ona. A més a més, hi superposem els resultats que s'han obtingut en l'experiment anterior:

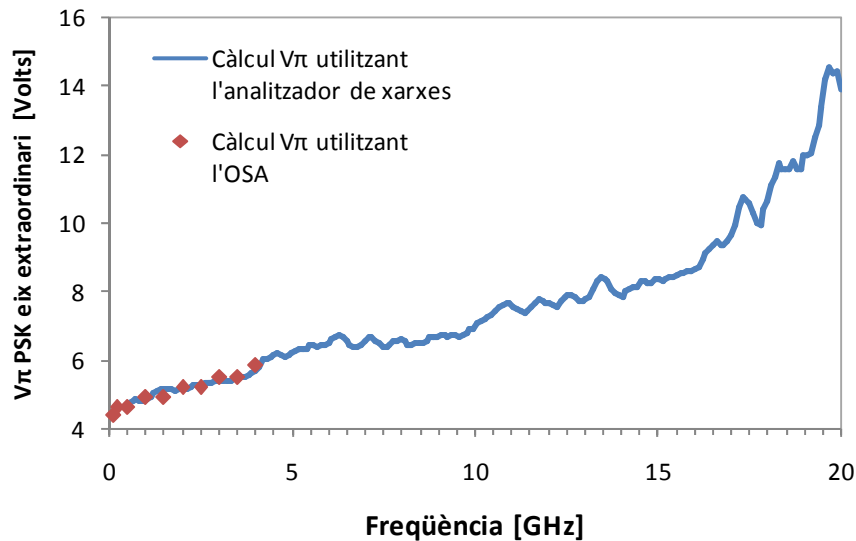


Fig. 4.37 Voltatge de mitja ona de la modulació PSK de l'eix extraordinari ( $V_{\pi_e}$ ) en funció de la freqüència des de 0 fins a 20 GHz

Es pot veure a la gràfica que els valors del voltatge de mitja ona calculats mitjançant l'oscil·loscopi coincideixen amb força exactitud amb els valors calculats utilitzant la resposta freqüencial del modulador calculada amb l'analitzador de xarxes.

Podem fer un zoom dels valors de  $V_{\pi_e}$  per a les freqüències entre 0 i 4 GHz per a comprovar que els valors calculats amb els dos mètodes coincideixen amb força exactitud.

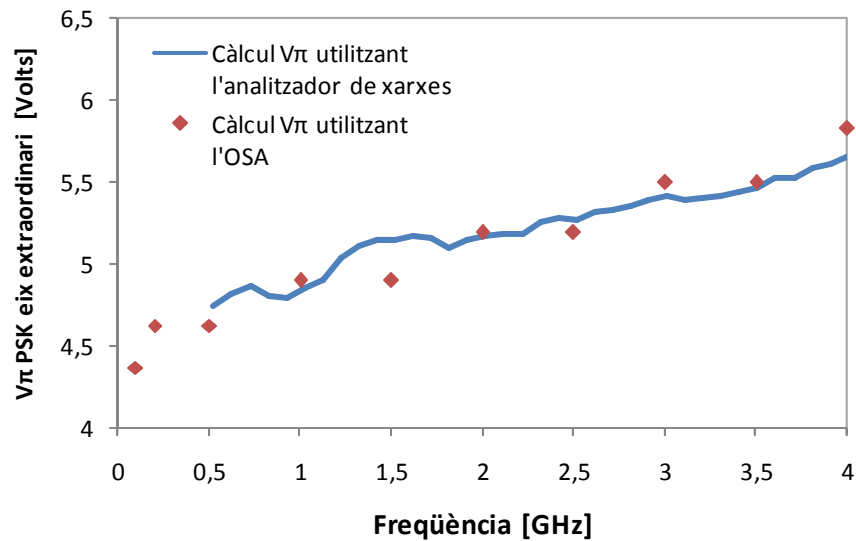


Fig. 4.38 Comparació dels valors de  $V_{\pi_e}$  calculats uns mitjançant l'OSA i els altres amb l'analitzador de xarxes

Efectivament, tal com s'estava esperant els punts calculats utilitzant l'oscil·loscopi s'ajusten molt bé a la corba del valor de  $V_{\pi_e}$  calculada amb l'analitzador de xarxes.

#### 4.6.2. Mesura del $V_{\pi_0}$ del modulador

Només s'ha fet la mesura per a l'eix extraordinari del modulador, ja que, no ha estat possible realitzar la mesura per a l'eix ordinari. Això és, perquè el valor del  $V_{\pi_0}$  esdevé molt gran. Això és a causa de que el valor de  $V_{\pi_0}$  és molt més gran que el valor de  $V_{\pi_e}$  ( $V_{\pi_0} \gg V_{\pi_e}$ ).

Com que no és possible calcular el valor del voltatge de mitja ona per a la modulació de fase de l'eix ordinari d'aquesta manera, el que s'ha fet és calcular-lo matemàticament a partir del valor de  $V_{\pi_e}$  de l'eix extraordinari i de  $V_{\pi_{PolSK}}$ .

Recordem quina era la formulació:

$$\Delta\Phi_{PolSK} = \Delta\Phi_e - \Delta\Phi_o \tag{3.28}$$

Per tant,

$$\Delta\Phi_{PolSK} = \frac{\pi}{V_{\pi_e}}V(t) - \frac{\pi}{V_{\pi_o}}V(t) = \pi V(t) \cdot \left[ \frac{1}{V_{\pi_e}} - \frac{1}{V_{\pi_o}} \right] \tag{3.29}$$

Simplificant,

$$\Delta\Phi_{PolSK} = \frac{\pi}{V_{\pi_{PolSK}}}V(t) \text{ on } V_{\pi_{PolSK}} = \frac{V_{\pi_e} \cdot V_{\pi_o}}{V_{\pi_o} - V_{\pi_e}} \tag{3.30}$$

Amb aquesta equació ja podem calcular el valor del voltatge de mitja ona per a la modulació PSK de l'eix ordinari.

Com que el valor de  $V_{\pi_o} \gg V_{\pi_e}$  podem expressar el  $V_{\pi_{PolSK}}$  com:

$$V_{\pi_{PolSK}} = \frac{V_{\pi_e} \cdot V_{\pi_o}}{V_{\pi_o} - V_{\pi_e}} = \frac{V_{\pi_e}}{1 - \frac{V_{\pi_e}}{V_{\pi_o}}} \text{ on } V_{\pi_o} \gg V_{\pi_e}$$

Per tant,

$$V_{\pi_{PolSK}} \approx V_{\pi_e}$$

Que  $V_{\pi_o} \gg V_{\pi_e}$  significa que el modulador treballant en l'eix ordinari necessita molta potència elèctrica per a produir un desfasament al senyal òptic d'entrada. A la pràctica, podem afirmar que el modulador no ens serveix com a modulador de fase quan la llum incideix alineada a l'eix ordinari.

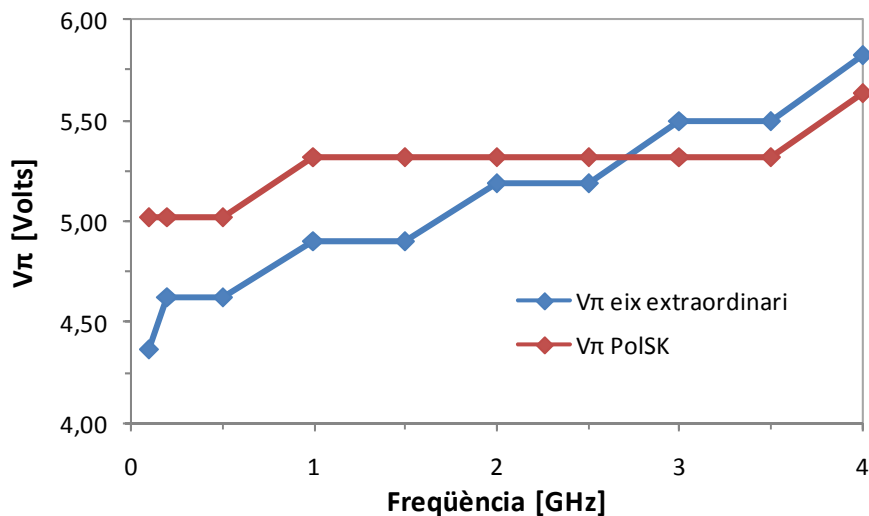


Fig. 4.39 Comparació dels valors del  $V_{\pi_{PolSK}}$  i del  $V_{\pi_e}$



Tenim a la gràfica anterior dibuixat els valors del voltatge de mitja ona del modulador per als dos casos. És a dir, quan el modulador actua com a modulador de polarització òptim ( $V_{\pi_{POLSK}}$ ) i, quan la llum es injectada per l'eix extraordinari i actua com a modulador de fase ( $V_{\pi_e}$ ). Aquests valors són molt similars i per tant, podem afirmar que  $V_{\pi_o} \gg V_{\pi_e}$ . Això significa que no podem utilitzar el modulador per a modular informació en fase quan la llum incideix amb una polarització alineada a l'eix ordinari del modulador.



## 5. Conclusions

En aquest projecte s'ha realitzat l'anàlisi d'un modulador de polarització basat en tecnologia d'òptica integrada i substrat de Niobat de Liti ( $\text{LiNbO}_3$ ).

S'ha fet un anàlisi teòric de les propietats dels medis òptics com l'efecte Pockels, la birefringència i la dispersió per mode de polarització. Aquest estudi teòric ens ha permès veure com la tecnologia d'òptica integrada, utilitzant com a substrat de les guies d'ona el Niobat de Liti, permet la creació de components com el modulador electroòptic de polarització.

S'ha vist que la característica electroòptica del Niobat de Liti permet variar els índex de refracció del material proporcionalment a la diferència de potencial aplicada al cristall i, que la variació dels índex de refracció provoca que la llum que passa per la guia, es moduli.

S'han estudiat les diferents alternatives que existeixen per a modular la llum utilitzant el Niobat de Liti, com són la modulació de fase (PSK), la modulació d'amplitud (ASK), la modulació de freqüència (FSK) i la modulació de polarització (PolSK).

S'ha desenvolupat un model teòric del modulador utilitzant les matrius de Jones que permet caracteritzar completament el comportament del modulador per a qualsevol senyal òptic d'entrada.

Un cop fet aquest estudi teòric s'ha caracteritzat el modulador de polarització. Hem vist els diferents modes d'operació del modulador: quan actua com a modulador de polarització i quan actua com a modulador de fase.

S'ha demostrat experimentalment i matemàticament que el modulador actua com a modulador de polarització òptim quan l'estat de polarització de la llum

incident és lineal orientat de tal manera que formi un angle de  $45^\circ$  amb els eixos del cristall de Niobat de Liti. També s'ha demostrat que quan la polarització del senyal d'entrada al modulador està orientada a l'eix extraordinari del cristall aquest actua com a modulador de fase, i quan està orientada a l'eix ordinari, no funciona com a modulador de fase.


Els valors característics del modulador han sigut mesurats mitjançant diferents experiments que s'han anat desenvolupant al llarg del projecte. Així doncs, s'ha realitzat la mesura del valor del voltatge de mitja ona per tot el rang de freqüències del modulador tant per a la modulació de polarització (PolSK) com per a la modulació de fase (FSK).

Aquestes característiques permeten que el modulador, efectuï una modulació de la llum, amb un rang d'operació de 0 a 7 V per a ones de longitud 1550 nm i per a freqüències de fins a 10 GHz tant en fase com en polarització.

El resultat d'aquest projecte pot servir per a dur a terme futurs treballs com ara la investigació de diverses aplicacions tals com el *polarization scrambler*, els esquemes de diversitat en polarització en receptors heterodins, el *polarization multiplexer*... Així mateix, es poden desenvolupar esquemes de transmissió amb modulacions multinivell tant per a la PolSK com per a la PSK.

# Annexos


## Annex 1. Modulador de polarització

 <p><b>OTI</b> Optical Technologies</p> <p>Title: 10 GHz Polarization Scrambler Document Type: CUSTOMER PRODUCT SPECIFICATION</p>	<p>DOCUMENT N°: DRAFT PRODUCT REV.: -A</p>
	<p>DOCUMENT REV.: -A SHEET N°: 2 Of. 5</p>

REV.N	REF.N°	DESCRIPTION OF CHANGE
A		First issue

### CONTENTS

<b>1. GENERAL SPECIFICATIONS</b> .....	<b>3</b>
1.1 PACKAGE CONFIGURATION.....	3
1.2 OPTICAL FIBER CHARACTERISTICS.....	3
1.3 DIMENSIONS.....	4
<b>2 ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS</b> .....	<b>4</b>
<b>3 OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS</b> .....	<b>5</b>
<b>4 ORDERING INFORMATION</b> .....	<b>5</b>

	<b>DOCUMENT N°: DRAFT</b> <b>PRODUCT REV.: -A</b>		
	<b>DOCUMENT REV.: -A</b> <b>SHEET N°: 3 Of. 5</b>		
<b>Title: 10 GHz Polarization Scrambler</b> <b>Document Type: CUSTOMER PRODUCT SPECIFICATION</b>			


## 1. GENERAL SPECIFICATIONS

### 1.1 PACKAGE CONFIGURATION

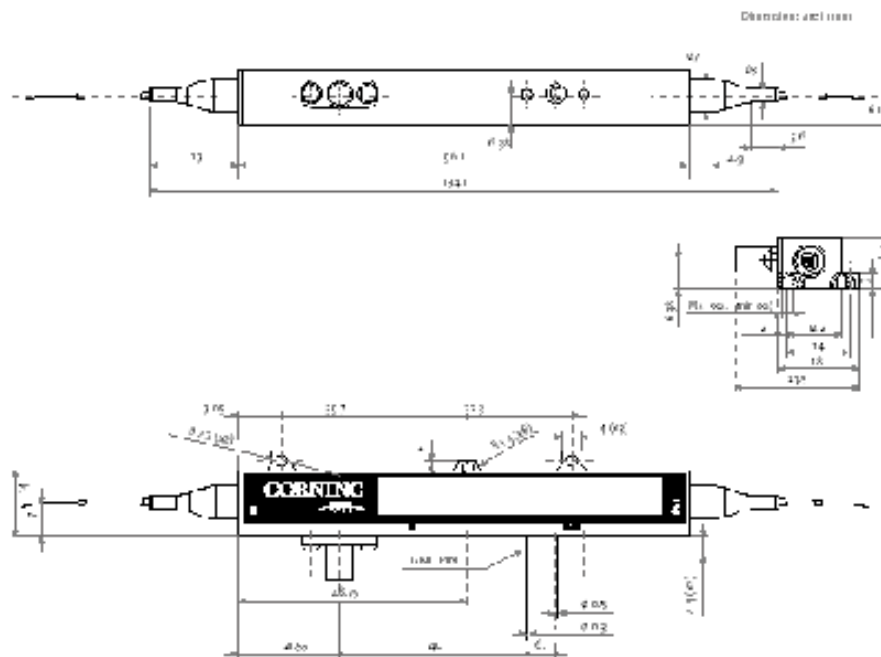
RF input port	K Connector
Optical Input	Polarization Maintaining Fiber (PMF)
Optical Output	Standard Single Mode Fiber (SMF)

### 1.2 OPTICAL FIBER CHARACTERISTICS

Input Pigtail Length	$\geq 1$ m
Output Pigtail Length	$\geq 1$ m
Input Fiber	Corning/Fujikura SM15-P-8/125-UV/UV250
Output Fiber	Corning SMF28
Cabling (input & output)	900 $\mu$ m loose tube
Minimum Bending Radius	25 mm
Input optical connector	FC/SPC slow axis key
Output optical connector	FC/SPC slow axis key


	DOCUMENT N°: DRAFT
	PRODUCT REV.: -A
	DOCUMENT REV.: -A
Title: 10 GHz Polarization Scrambler	SHEET N°: 4 Of. 5
Document Type: CUSTOMER PRODUCT SPECIFICATION	

### 1.3 DIMENSIONS



### 2 ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

PARAMETER	CONDITION	RATINGS	UNIT
Operating Case Temperature		0 to +70	°C
Storage Temperature		-40 to +85	°C
Max Input Power (Electrical)	RF-port	30	dBm
Max Input Power (Optical)	CW	100	mW

	<b>DOCUMENT N°:</b> DRAFT <b>PRODUCT REV.:</b> -A
	<b>DOCUMENT REV.:</b> -A <b>SHEET N°:</b> 5 Of. 5
<b>Title:</b> 10 GHz Polarization Scrambler <b>Document Type:</b> CUSTOMER PRODUCT SPECIFICATION	

### 3 OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(Top=25°C , BOL , Wavelength = 1555 nm, unless otherwise specified)

PARAMETER	CONDITION	LIMIT			UNIT
		min	typ	max	
<b>OPTICAL</b>					
Operating Wavelength		1530		1570	nm
Optical Insertion Loss	No connectors EOL and all operating wavelengths			3.5	dB
Optical Return Loss		45			dB
<b>ELECTRICAL</b>					
RF Input Port Impedance			50		$\Omega$
- 3 dB E/O Bandwidth		10			GHz
$S_{11}$	0.13 GHz -10 GHz			-10	dB
RF $V_{\pi}$ Voltage	meas. @ 1 kHz		5.5	6	V
	meas. @ 10 GHz		8.5	10.0	V

### 4 ORDERING INFORMATION

PSO-S-10S-PP-FPFP-01



## Annex 2. Disseny d'un controlador de polarització manual

En els sistemes de comunicació per fibra òptica cada cop es fa més necessari el control de la polarització ja que, a mesura que augmenta la taxa de bits transmesos, augmenta la sensibilitat dels sistemes a la polarització.

Els principals problemes dels sistemes de comunicacions òptics relacionats amb la polarització són els següents:

- **Polarization Mode Dispersion** (PMD) en les fibres òptiques
- **Polarization Depends Loss** (PDL) dels components òptics passius
- **Polarization Depends Modulations** (PDM) dels moduladors electroòptics
- **Polarization Depends Gain** (PDG) en amplificadors òptics

Si les fibres fossin perfectes, l'estat de polarització de la llum del senyal romandria constant. Tanmateix, el SOP de la llum que es propaga a través d'una fibra de comunicació estàndard, varia al llarg de la fibra a causa de la birefringència induïda, degut a la alteració de la naturalesa circular del nucli de la fibra. Aquesta alteració de l'ideal isotropia del nucli de la fibra provoca canvis en l'índex de refracció del nucli i per tant, canvis en l'estat de polarització de la llum.

A més a més, per a la realització dels experiments necessaris per a desenvolupar aquest projecte és molt important tenir ben caracteritzada i controlada la polarització. És tracta d'un projecte on es pretén utilitzar diferents estats de polarització per a modular el senyal.

Per tot això, és molt important tenir quelcom que ens permeti controlar i manipular l'estat de polarització de la llum, per tal d'optimitzar les comunicacions.

Existeixen diferents alternatives de controladors de polarització. Els controladors de polarització es poden classificar en tres categories:

- Múltiples retardadors amb retards fixos però angles d'orientació variables;
- Un sol retardador amb retard i orientació variable;
- Múltiples retardadors amb orientació fixa i retard variable;

A continuació, s'expliquen els tres mètodes més comuns que s'utilitzen per a controlar la polarització.

Un controlador de polarització clàssic consisteix en tres retardadors tal com mostra la fig. a.1. Aquesta configuració consta d'un *Half-Wave Plate* (HWP) posat entre dos *Quarter-Wave Plate* (QWPs). Aquests retardadors poden rotar lliurement al voltant del raig òptic.

El primer QWP converteix qualsevol polarització d'entrada arbitrària en una polarització lineal. El HWP llavors alterna la polarització lineal a un angle desitjat de manera que el segon QWP pugui convertir la polarització lineal a qualsevol estat de polarització desitjat. En aquesta solució, el retard és fix, però els angles relatius dels retardadors són variables.

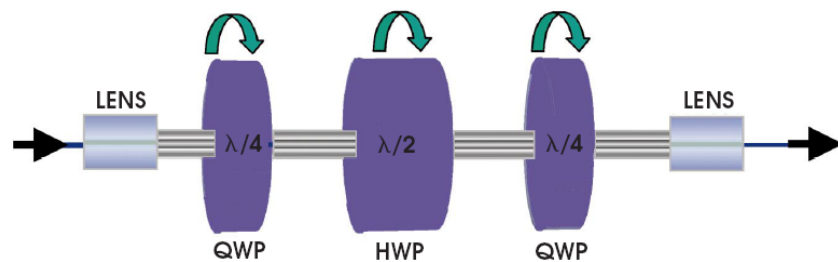


Fig. A.1 Controlador de polarització utilitzant múltiples wave plates amb retard fix i orientació variable en l'espai lliure

La forma més senzilla de realitzar els retardadors és utilitzant fibra enrotllada. La fibra enrotllada provoca un augment de la birefringència de la fibra proporcional al quadrat del diàmetre de les voltes de la fibra. Ajustant el diàmetre i el nombre de voltes es pot crear qualsevol retardador.

El principal desavantatge d'aquesta solució és que la velocitat de control és limitada, ja que el control de la polarització es realitza manualment. A més a més, la curvatura de les fibres provoca pèrdues d'inserció que augmenten conforme disminueix el diàmetre de les voltes de fibra. Malgrat això, és una bona solució, ja que aquesta és barata i s'obtenen bons resultats.

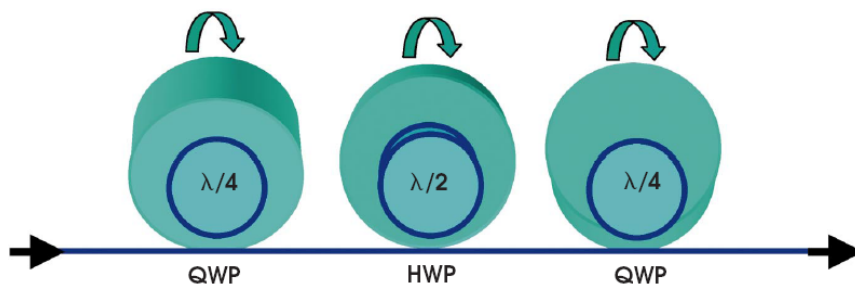


Fig. A.2 Controlador de polarització utilitzant múltiples wave plates amb retard fix i orientació variable de fibra enrotllada.

Per a certs sistemes de comunicació, la velocitat en què es poden moure els retardadors és essencial per al seu bon funcionament. Per aquesta raó

existeixen controladors de polarització d'alta velocitat basats en sistemes electroòptics de  $\text{LiNbO}_3$  (Veure fig. a.3). Aquesta solució consta de tres seccions de guia d'ona, dues que simulen un QWP i una altra que simula un HWP. En comptes de fer girar els retardadors podem aplicar un voltatge adequat a aquestes seccions de guia d'ona que determinarà l'orientació relativa (eix òptic eficaç) de cada un.

Desafortunadament, aquesta solució té pèrdues d'inserció i PDL elevades i un alt cost d'implementació.

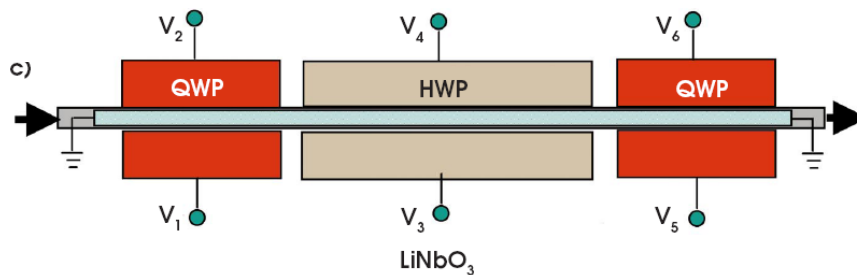


Fig. A.3 Controlador de polarització utilitzant guies d'ona electroòptiques de  $\text{LiNbO}_3$

La segona aproximació es basa en el Babinet-Soleil Compensator. Es tracta d'un controlador de polarització amb un únic retardador amb retard i orientació variable. El controlador està fet amb un retardador construït amb dos cristalls birefringents en forma de cunya. El retard varia fent lliscar les dues falques l'una contra l'altra. L'orientació del retardador també gira al voltant del raig òptic (Veure fig. a.4).

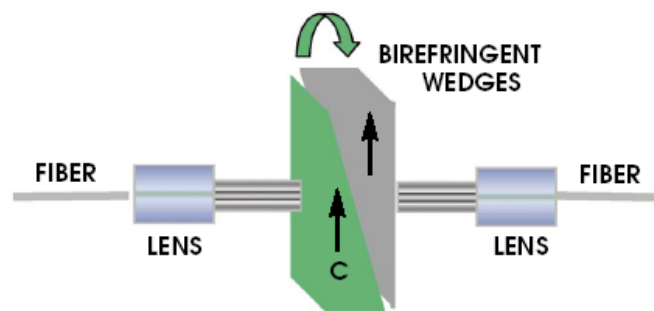


Fig. A.4 Controlador de polarització amb un únic retardador de retard i orientació variable.

Aquesta solució es pot realitzar completament en fibra tal com mostra la fig. a.5, utilitzant un *fiber squeezer* giratori al voltant de la fibra òptica.

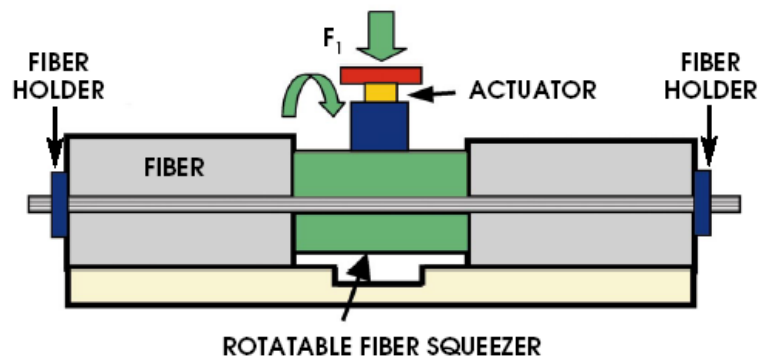


Fig. A.5 Control de polarització amb un *fiber squeezer* giratori

Aquesta solució té poques pèrdues d'inserció, redueix la dependència amb la longitud d'ona i té un cost baix; a més a més, és un dispositiu de dimensions reduïdes. El principal desavantatge és la velocitat de control de la polarització perquè aquest control es du a terme manualment.

Els controls de polarització també poden ser fets amb múltiples *wave plates* fixos orientats a  $45^\circ$  els uns dels altres. El retard de cada *wave plate* varia amb el voltatge aplicat, tanmateix, l'angle d'orientació de cadascun d'ells és fix. Existeixen la solució en l'espai lliure (Veure fig. a.6) i la solució realitzada completament en fibra (Veure fig. a.7).

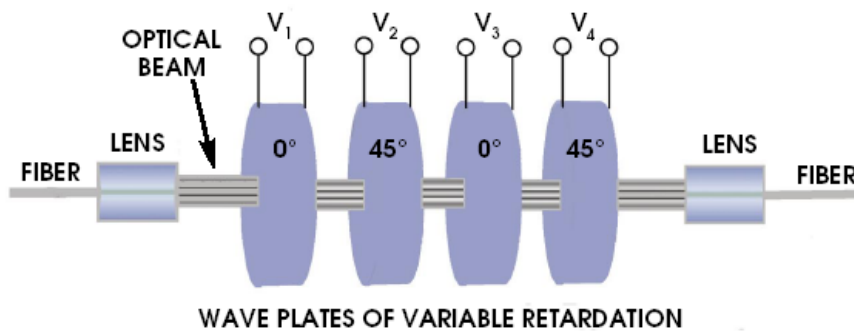


Fig. A.6 Múltiples *wave plates* amb orientació fixa i retard variable, aproximació en l'espai lliure

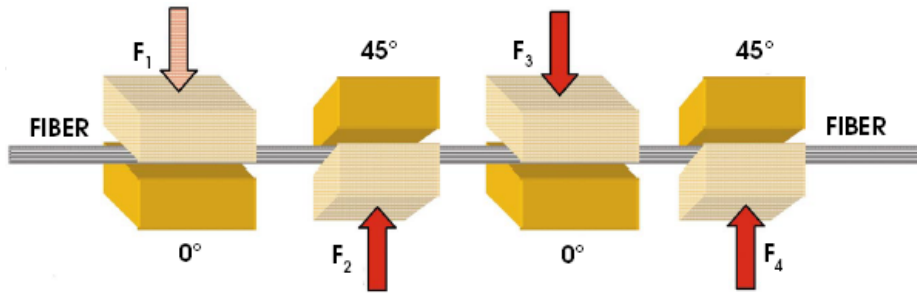


Fig. A.7 Múltiples *wave plates* amb orientació fixa i retard variable, realització completament en fibra

Aquestes alternatives ens permeten un control de la polarització a alta velocitat, però el cost d'implementació és alt i tenen unes pèrdues d'inserció elevades (45), (46).

Finalment podem construir un controlador de polarització basat en rotadors de faraday.

Aquests controlador esta constituït per dos rotadors de faraday amb un QWP entre ells. Per canviar el SOP incident els rotadors utilitzen l'efecte faraday, és a dir, s'indueix birefringència a la fibra aplicant un camp magnètic longitudinal.

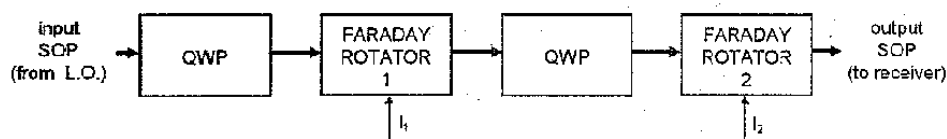


Fig. A.8 Controlador de polarització basat en rotadors de faraday

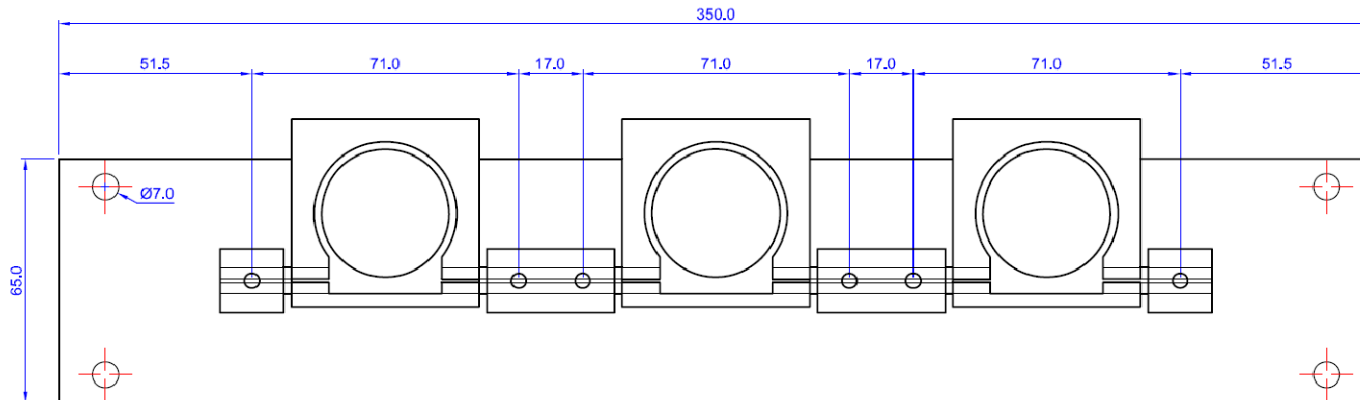
Els principals avantatges d'aquest controlador són varies, per una banda, és un dispositiu fabricat tot en fibra i sense parts mecàniques i per l'altra, pot controlar la polarització mitjançant un processador que controli el camp magnètic longitudinal. Això fa que aquest dispositiu tingui pèrdues òptiques baixes i resposta ràpida. (47)

Després d'estudiar les diferents alternatives que existeixen per a controlar la polarització de la llum s'ha de dissenyar el FPC (*Fiber Polarization Controller*) que més ens convingui per a la realització dels experiments. En aquest cas, la solució escollida és la d'un controlador de polarització utilitzant múltiples *wave plates* amb retard fix i orientació variable de fibra enrotllada perquè és una solució econòmica, de fàcil construcció i de funcionament senzill.

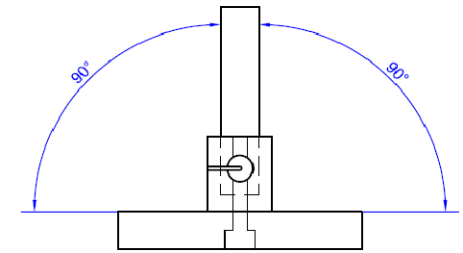
Per a construir el controlador de polarització s'ha escollit l'alumini, a causa de la seva resistència i duresa.

A continuació tenim els plànols detallats del controlador dissenyat i del seu especejament.

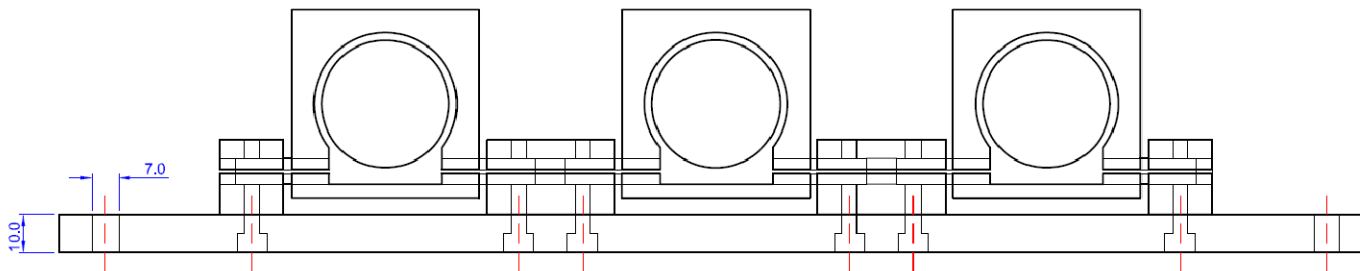
# FPC - Fiber Polarization Controller



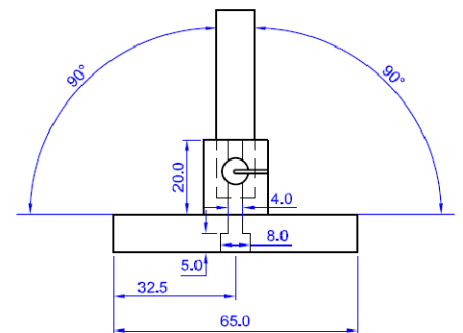
**PLANTA ( pales girades 90° respecte l'alçat)**



**Alçat lateral dret**

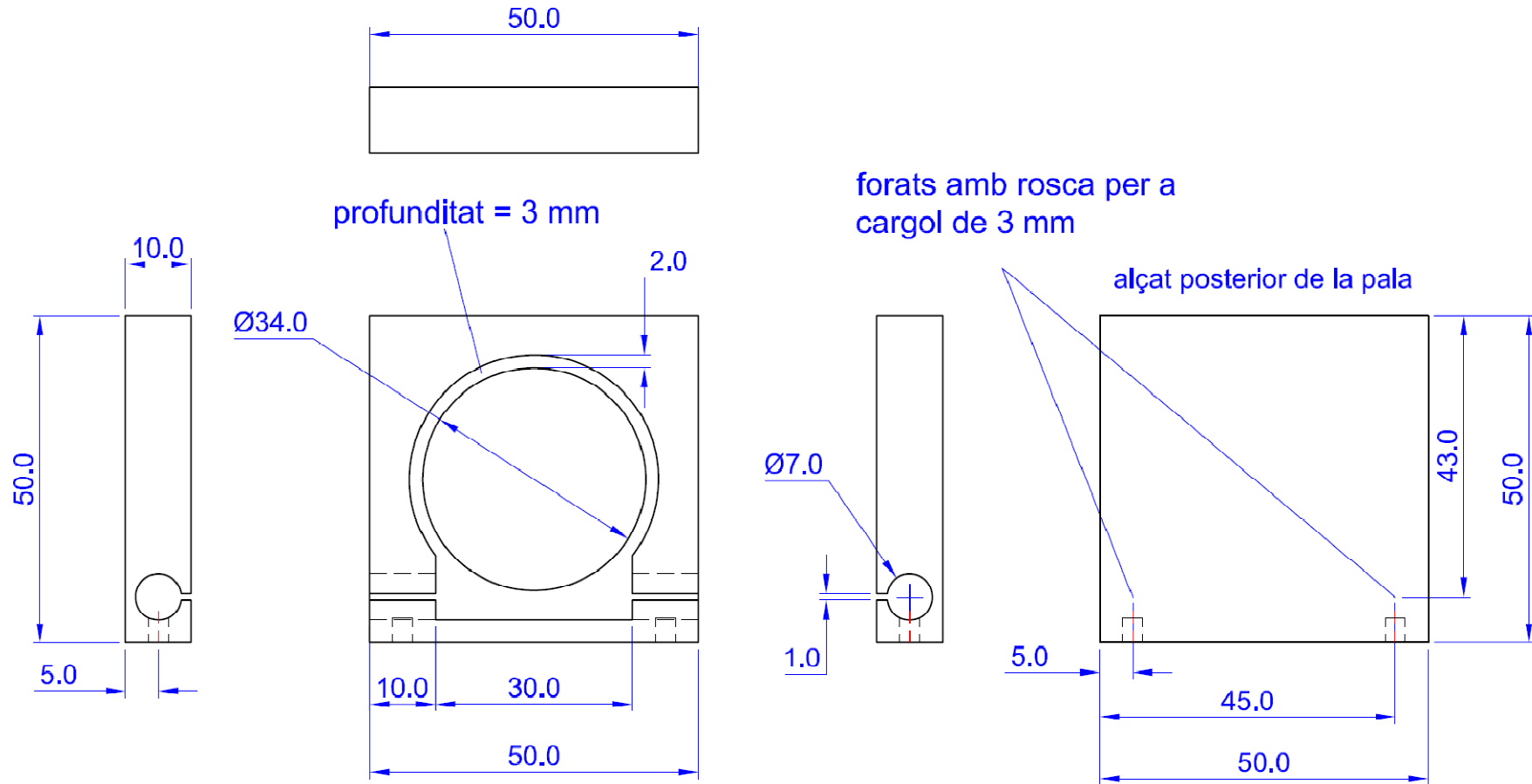


**ALÇAT ( pales en posició vertical)**



**Alçat lateral esquerre**

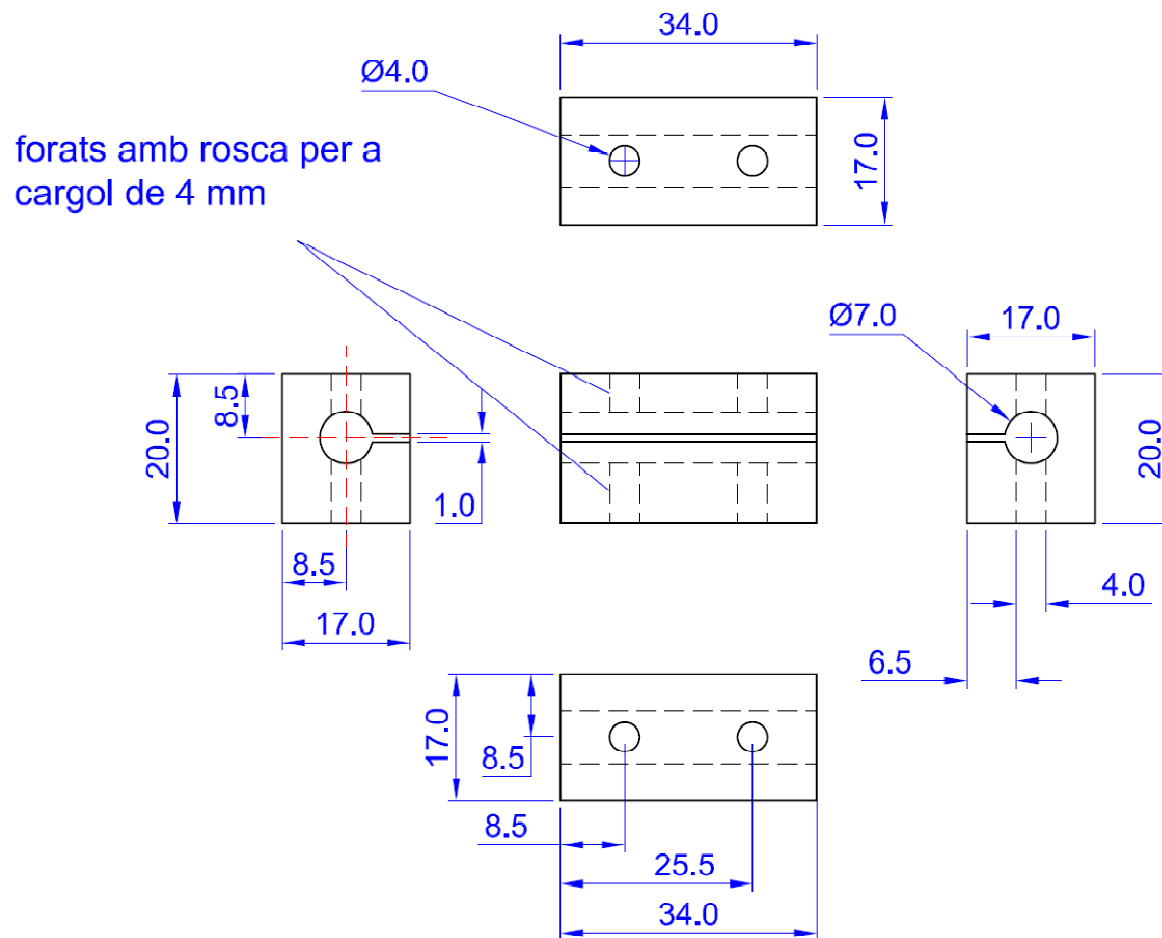
# Peça 1



Escala 1:1



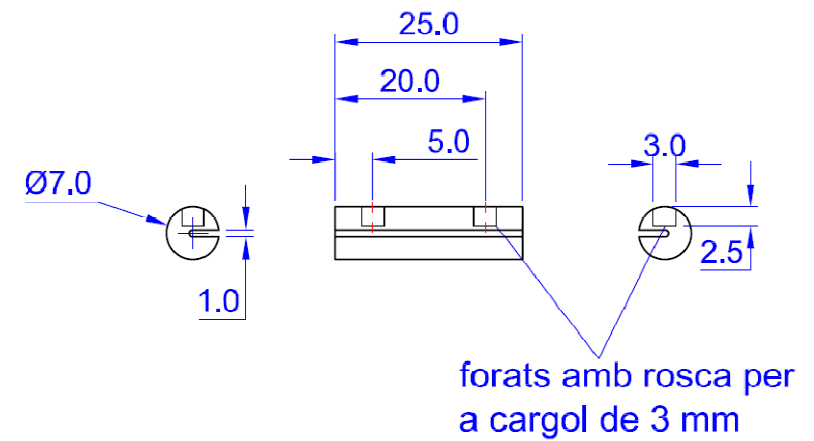
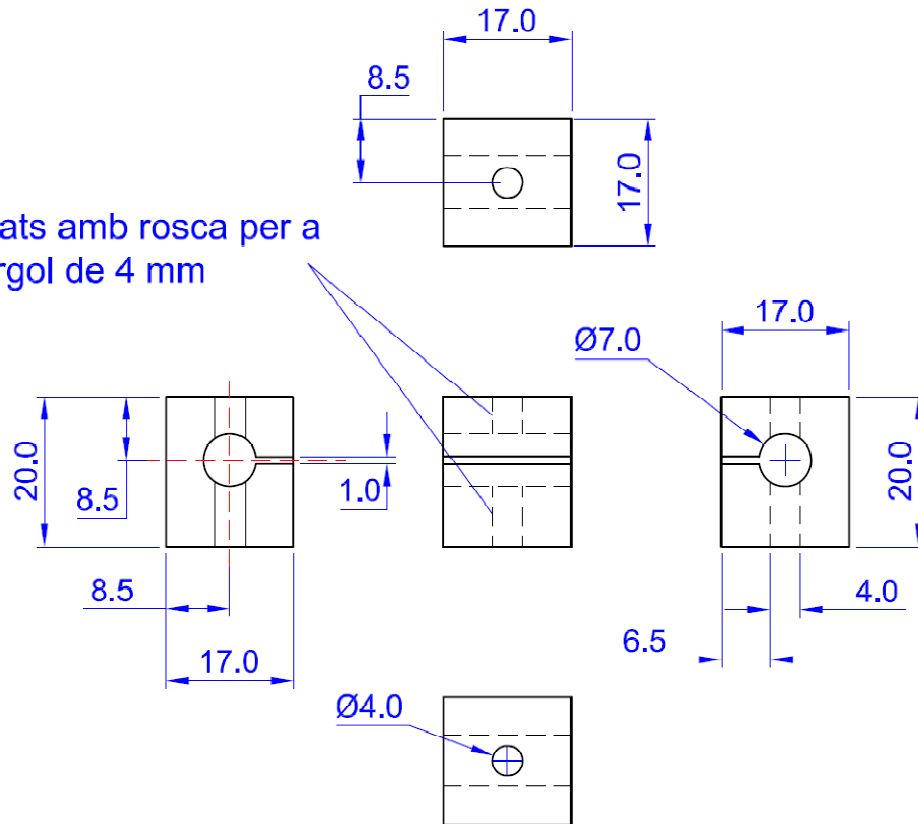
## Peça 2



Escala 1:1

**Peça 3****Peça 4**

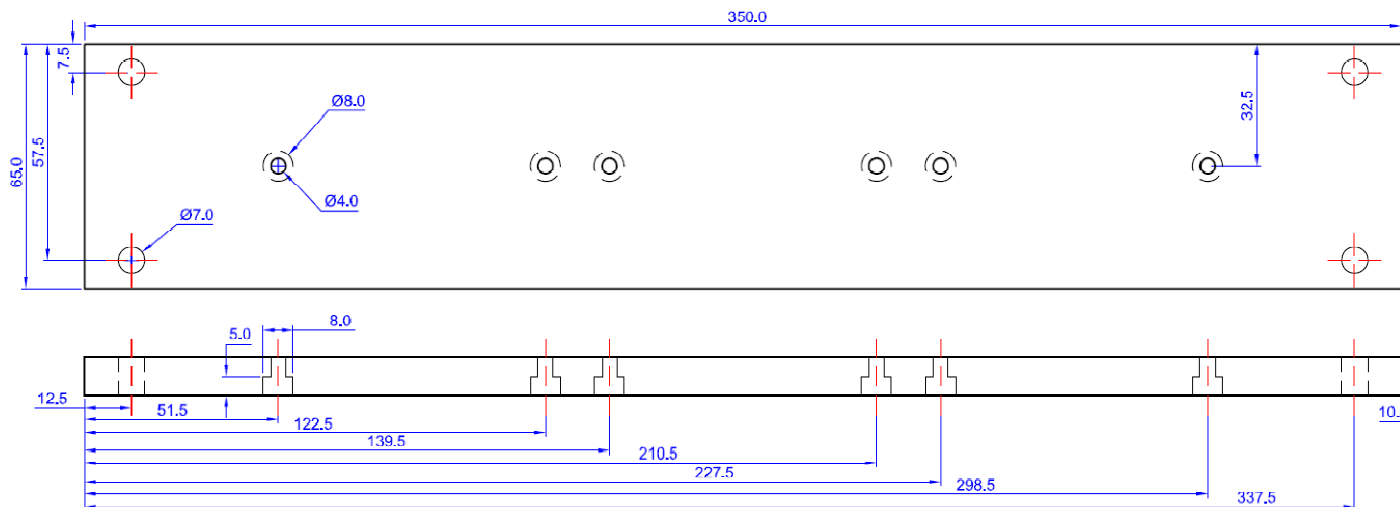
forats amb rosca per a  
cargol de 4 mm



forats amb rosca per a  
cargol de 3 mm

Escala 1:1

## Peça 5



Escala 1:2

Especejament	
Peça	Número de peces
1	3 unitats
2	2 unitats
3	2 unitats
4	6 unitats
5	1 unitats

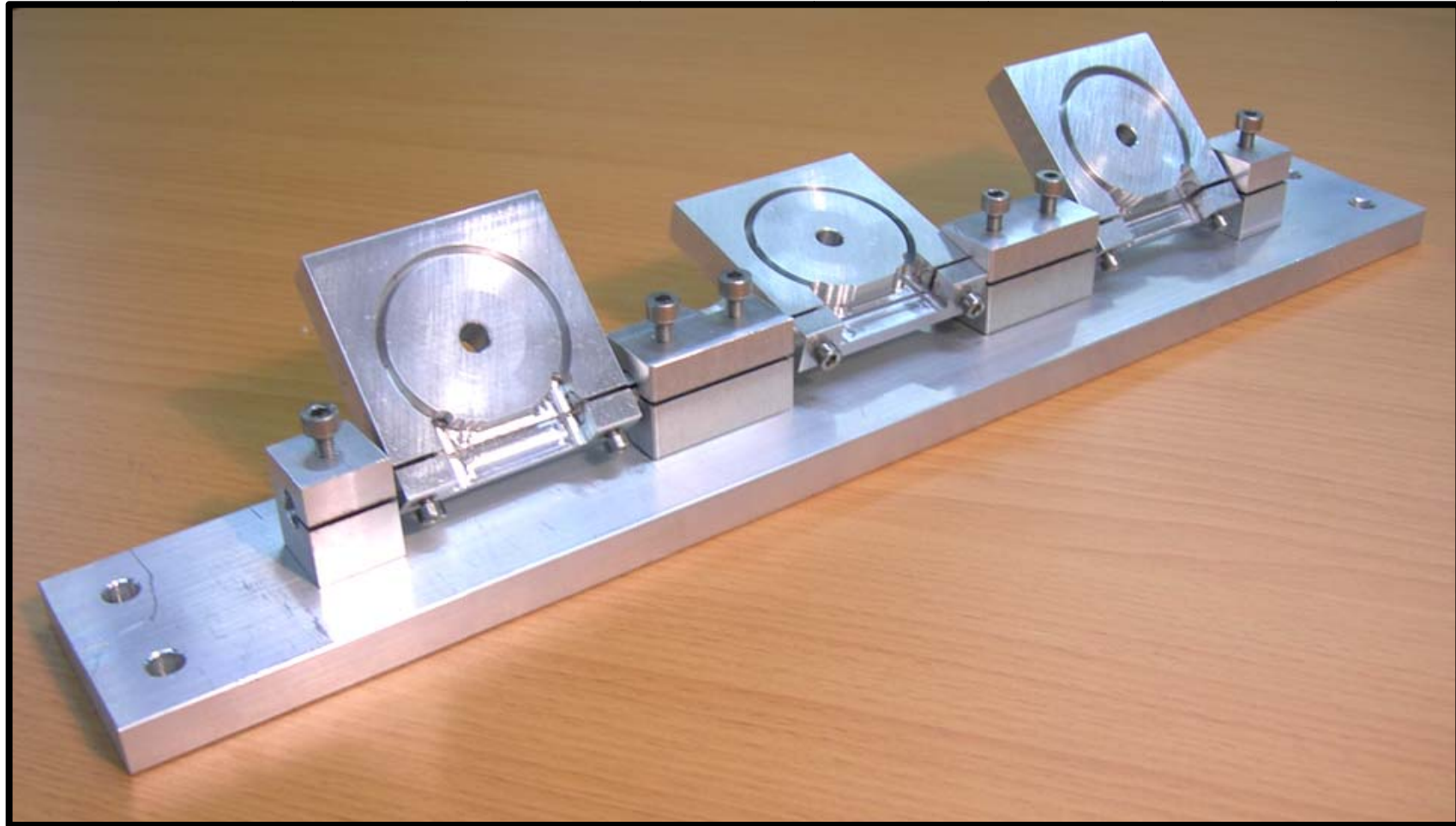


Fig. A.9 Fotografia del *Fiber Polarization Controller* construït

# Referències

- [1]. **Capmany, José, Peláez, F. Javier y Martí, Javier.** *Fundamentos de Comunicaciones Ópticas*. 2ª edició revisada. Madrid : Síntesis, S.A., 2001. ISBN: 84-7738-599-8.
- [2]. Tutorial de Comunicaciones Ópticas. [En línea] Grupo de Comunicaciones Ópticas, Universidad de de Valladolid. [Citado el: 4 de Març de 2008.] [http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2\\_1\\_1.htm](http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_1_1.htm).
- [3]. **Bonada Bo, Francesc.** *Anàlisi dels límits tecnològics d'accés de banda ampla, solucions FTTH i Amplificació òptica en accés*". Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya, Grup de Comunicacions Òptiques, 2007.
- [4]. *Polarization modulation and demodulation of light.* **Niblack, W. y E., Wolf.** 2, Febrer de 1964, Applied Optics, Vol. 3, pág. 277.
- [5]. *Theory of Polarization Shift Keying Modulation.* **Benedetto, Sergio y Poggiolini, Pierluigi.** Núm 4, Abril de 1992, IEEE Transactions on Communications, Vol. Vol. 40, págs. pàgs 708-721.
- [6]. *Heterodyne Transmission of a 560 Mbits/s Optical Signal By Means of Polarisation Shift Keying.* **Dietrich, E., y otros.** 8, Abril de 1987, Electronics Letters, Vol. 23, págs. 421-422. ISSN: 0013-5194.
- [7]. *Polarization shift keying - direct detection (PoISK-DD) scheme for fiber nonlinear effect insensitive communication system Germany.* **Fukuchi, K., y otros.** Berlin : s.n., Setembre de 1992, Proc. Eur. Conf. Optical Communication (ECOC 92), págs. 169–172.
- [8]. *Direct Detection of Optical Digital Transmission Based on Polarization Shift Keying Modulation.* **Benedetto, Sergio, Gaudio, R. y Poggiolini, P.** 3, Abril de 1995, IEEE Journal on Selected Areas Communications., Vol. 13, págs. 531-542.
- [9]. **Cedrón Río, Juan Pablo.** *Diseño de un sistema de transmisión y detección directa con modulación de la Polarización de la luz (PoISK)*. Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya, Grup de Comunicacions Òptiques, 2003.

- [10]. **Garrick New, Chee keong.** *Polarisation Modulation in Ultra-Long Haul Optical Transmission.* s.l. : University of Queensland, Department of Computer Science and Electrical Engineering, 2000.
- [11]. **Born, M. y Wolf, E.** *Principles of Optics.* Oxford : Pergamon Press, 1975.
- [12]. Viquipèdia, L'enciclopèdia lliure. [En línea] [http://ca.wikipedia.org/wiki/Polaritzaci%C3%B3\\_electromagn%C3%A8tica](http://ca.wikipedia.org/wiki/Polaritzaci%C3%B3_electromagn%C3%A8tica).
- [13]. **Saleh, BEA y Teich, MC.** *Fundamental of Photonics.* New York : A Wiley Interscience Publication, 1991.
- [14]. University of Colorado at Boulder. <http://www.colorado.edu/>. [En línea] <http://www.colorado.edu/physics/2000/polarization/index.html>.
- [15]. *Multilevel Polarization Shift Keying: Optimum Receiver Structure and Performance Evaluation.* **Benedetto, S. y Poggiolini, P.T.** Núm 2/3/4, Abril de 1994, IEEE Transactions on Communications, Vol. Vol. 42, págs. pàgs. 1174-1186.
- [16]. **Hodzic, Anes i Sikora, Thomas.** *Investigation of high bit rate optical transmission systems employing a channel data rate of 40 Gb/s.* Berlin : Technical University of Berlin, School of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2004.
- [17]. **López Camacho, Adolfo.** Universidad de Córdoba. *Dispositivos Acustoópticos y electroópticos.* [En línea] <http://rabfis15.uco.es/Diacel/main.html>.
- [18]. Case Western Reserve University and Kent State University. *Polymers & Liquid Crystals.* [En línea] 2004. <http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/main.htm>.
- [19]. *Polarization mode dispersion in single-mode fibers.* **Rashleigh, S. C. y Ulrich, R.** No. 2, Stuttgart : s.n., Agost de 1978, Optics Letters, Vol. Vol. 3.
- [20]. **Jiménez Peñaloza, José Luis.** *Tesis: Caracterización del modulador electro-óptico APEtm microwave analog intensity con aplicación de transmisión de video compuesto.* Mèxic : Departamento de Ingeniería Electrónica, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla, 2005.

- [21]. **Saleh, B.E.A. y Teich, M. C.** *Fundamental of Fotonics (Second edition)*. New Jersey : Wiley Interscience, 2007. 978-0-471-35832-2.
- [22]. **U., Pochi Yeh . E.** *Introduction to photorefractive Nonlinear Optics*. New York : John Wiley & Sons, 1993.
- [23]. textoscientificos.com. [En línea] 2005. [Citado el: 20 de Febrer de 2008.] <http://www.textoscientificos.com/redes/modulacion>.
- [24]. **Chang, Kai.** *Handbook of Microwave and Optical: Fiver and Electro-Optical Components*. s.l. : John Wiley & Sons. Inc., 1991. Vol. 4. ISBN 0471210099.
- [25]. **Gené Bernaus, Joan M.** *Investigation of advanced modulation formats for future optical fiber communications*. Barcelona : UPC-ETSETB, 2005. PhD thesis.
- [26]. **Paschotta, Dr. Rüdiger.** Encyclopedia of Laser Physics and Technology. *Electro-optic modulators*. [En línea] 2008. [http://www.rp-photonics.com/electro\\_optic\\_modulators.html](http://www.rp-photonics.com/electro_optic_modulators.html).
- [27]. *LiNbO3 high-speed optical FSK modulator*. **Kawanishi, T., y otros.** 11, 27 de Maig de 2004, IEEE Electronics Letters, Vol. 40.
- [28]. *High-Speed Optical FSK Modulator for Optical Packet Labeling*. **Kawanishi, Tetsuya, y otros.** 1, Tokyo : s.n., Gener de 2005, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 23, págs. 87-93.
- [29]. *Optical FSK/IM Signal Generation Using an Integrated Optical FSK Modulator*. **Kawanishi, Tetsuya, y otros.** 3, Tokyo : s.n., Maig de 2004, IEICE Electronics Express, Vol. 1, págs. 69-72.
- [30]. *All-optical modulation format conversion from frequency-shift-keying to phase-shift-keying*. **Kawanishi, Tetsuya, Sakamoto, Takahide y Izutsu, Masayuki.** Tokyo : s.n., 2005, National Institute of Information and Communications Technology, Optical Society of America.
- [31]. *PLSK vs. DPSK in Four-Wave Mixing Crosstalk*. **Islam, Mohammed N. y Kim, Jaeyoun.** Setembre de 2003, University of Michigan, Xtera Communications, Inc.
- [32]. *4-level direct-detection polarization shift-keying (DD-PolSK) system with phase modulators*. **Hu, E., et al.** Stanford : s.n., Març / 2003, Optical Fiber Communications Conference (OFC), Vol. vol.2, p. págs. 647- 649. ISBN: 1-55752-746-6.

- [33]. **Thorlabs, Inc.** Electro-optic Phase Modulator. Operating manual. [En línea] Agost de 2007. [www.thorlabs.com](http://www.thorlabs.com).
- [34]. Polarization Scrambler. [En línea] Corning O.T.I. <http://www.corning.com>.
- [35]. *An Application of Spherical Codes To Polarization Shift Keying Modulation.* **Pizurica, Aleksandra, Senk, Vojin i Pizurica, Veselin.** Núm 2, 1998, Electronics and Energetics, Vol. Vol. 11, p. pàgs. 207-221.
- [36]. *Dispersion-Shifted Fiber Polarization Scrambler Based on Faraday Effect.* **Prat, Josep y Comellas, Jaume.** 7, Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya, Juliol de 1999, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, pàgs. 845-847.
- [37]. *Electrooptic Polarization Scramblers for Optically Amplified Long-Haul Transmission Systems.* **Heismann, Fred, y otros.** 9, Setembre de 1994, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 6, pàgs. 1156-1158.
- [38]. *Compact Electro-Optic Polarization Scrambler for Optically Amplified Lightwave Systems.* **Heismann, Fred.** 8, Agost de 1996, Journal of Lightwave Technology, Vol. 14, pàgs. 1801-1814.
- [39]. *Comparison of Polarization Handling Methods in Coherent Optical Systems.* **Noé, Reinhold, y otros.** 10, Octubre de 1991, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 9, pàgs. 1353-1366.
- [40]. *Polarization-Switching Techniques for Coherent Optical Communications.* **Habbab, Isam M. I. y Leonard, J. Cimini, J r.** 10, Octubre de 1988, IEEE Journal of Lightwave technology, Vol. 6, pàgs. 1537-1548.
- [41]. Fujikura Global Home. [En línea] Maig de 2008. <http://www.fujikura.com/>.
- [42]. OZ Optics Limited. [En línea] <http://www.ozoptics.com/>.
- [43]. *Aplication Note: Spectral analysis of the RF phase modulation of an optical signal.* s.l. : Photline Technologies.
- [44]. *Bandwidth Measurement of Phase Modulators.* s.l. : Photline Technologies.
- [45]. *Polarization in Fiber Systems: Squeezing out More Bandwidth.* **Yao, Steve.** s.l. : Laurin Publishing, 2003, 2003, The Photonics Handbook.
- [46]. *Aplication Note: Polarization Control and Measurement for optical Fibers.* **Newport Corp. & Spectra-Physics Corp.**



- [47]. *Experimental Demonstration of an All-Fiber Endless Polarization Controller Based on Faraday Rotation*. **Prat, Josep, Comellas, Jaume y Junyent, Gabriel**. 12, Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya, Desembre de 1995, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 7, págs. 1430-1432.
- [48]. *A Novel Technique to Measure the Dynamic Response of an Optical Phase Modulator*. **Levesque, Marc, y otros**. Núm 5, Octubre de 1995, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. Vol. 44, págs. págs. 952-957.



# Índex de figures

## Capítol 1

Fig. 1.1 Sistema bàsic de transmissió per fibra òptica .....	10
Fig. 1.2 Comparació de les taxes de transmissió en funció de la distància de diferents tecnologies de comunicació.....	11
Fig. 1.3 Atenuació en la fibra òptica en funció de la longitud d'ona. Finestres de transmissió .....	12
Fig. 1.4 Nous serveis i amples de banda necessaris .....	13

## Capítol 2

Fig. 2.1 El·lipse de polarització.....	18
Fig. 2.2 Polarització lineal (12) .....	19
Fig. 2.3 Polarització circular (12) .....	19
Fig. 2.4 Polarització el·líptica (12) .....	20
Fig. 2.5 Polarització circular a esquerres .....	20
Fig. 2.6 Polarització circular a dretes .....	20
Fig. 2.7 Modificació del SOP en passar a través d'un medi .....	22
Fig. 2.8 Concatenació de dispositius òptics travessats per un feix de llum polaritzat.....	23
Fig. 2.9 Llum polaritzada .....	24
Fig. 2.10 Llum natural.....	24
Fig. 2.11 Representació de l'Esfera de Poincaré .....	28
Fig. 2.12 El·lipse de polarització.....	29
Fig. 2.13 Relació dels paràmetres de Stokes amb l'esfera de Poincaré .....	30

## Capítol 3

Fig. 3.1 Principis de modulació de senyals òptics .....	32
Fig. 3.2 Variació lineal de l'índex de refracció d'un material cristal·lí a causa de l'efecte Pockels. ....	33
Fig. 3.3 La llum que viatja a través d'un medi birefringent prendrà un dels dos camins en funció de la seva polarització. ....	35
Fig. 3.4 La birefringència de les fibres òptiques canvien el SOP de la llum .....	36
Fig. 3.5 Orientació dels eixos i els índex de refracció d'un cristall de $\text{LiNbO}_3$ ..	37
Fig. 3.6 Geometria típica dels moduladors electroòptics de $\text{LiNbO}_3$ . (a) tall en 'z' i propagació en 'y', (b) tall en 'x' propagació en 'y'. (22).....	38
Fig. 3.7 Senyal modulats en fase (23).....	39
Fig. 3.8 Variació de la fase en funció del voltatge aplicat a una cel·la Pockels	40
Fig. 3.9 Senyal d'intensitat modulada(23) .....	41
Fig. 3.10 Estructura d'un modulador d'intensitat mitjançant interferòmetre Mach-Zehnder.....	42
Fig. 3.11 Rang d'operació del modulador Mach-Zehnder (25) .....	43
Fig. 3.12 Modulador d'intensitat integrat tipus Mach-Zehnder.....	44
Fig. 3.13 Modulador electroòptic d'intensitat mitjançant retardador dinàmic ....	44
Fig. 3.14 Senyal modulats en freqüència (23).....	45
Fig. 3.15 Modulador òptic extern FSK (30).....	46
Fig 3.16 Punts de la constel·lació del senyal per alguns exemples d'esquemes de modulació M-PolSK. (a) 2-PolSK, (b) 4-PolSK quadrat, (c) 4-PolSK tetraedre, (d) 6-PolSK icosaèdre, (e) 8-PolSK cup.....	47
Fig. 3.17 Modulació de polarització binària amb estats de polarització vertical i horitzontal.....	47
Fig. 3.18 Modulador de polarització (31) .....	48
Fig. 3.19 Disseny d'un modulador de polarització basat en un modulador de fase de $\text{LiNbO}_3$ . ....	50

Fig. 3.20 Canvi en la polarització en travessar un cristall de $\text{LiNbO}_3$ quan no s'aplica voltatge de conducció.....	52
Fig. 3.21 Canvi en la polarització en travessar un cristall de $\text{LiNbO}_3$ quan s'aplica el voltatge de conducció $V\pi$ .....	52
Fig. 3.22 Canvis en l'estat de polarització de la sortida òptica segons el voltatge de conducció que s'aplica. (25).....	53
Fig. 3.23 Diagrama de blocs d'un receptor de M-PolSK basat en l'extracció del paràmetres d'Stokes (5).....	54
Fig. 3.24 Configuració del modulador de polarització per a que funcioni com un <i>polarization scrambler</i> (38).....	56
Fig. 3.25 Representació dels canvis de polarització del SOP de sortida d'un retardador de fase variable modulats a la freqüència $\Omega 2\pi$ : (a) entre $-\pi$ i $+\pi$ ; (b) entre $-0.7655\pi$ i $0.7655\pi$ . El retardador de fase està orientat a $0^\circ$ i el SOP incident és lineal a $45^\circ$ . (38).....	56
Fig. 3.26 <i>Polarization Scrambler</i> de dues etapes utilitzant dos moduladors de polarització orientats a $0^\circ$ i $45^\circ$ . (38).....	57
Fig. 3.27 Traça a l'esfera de Poincaré del SOP de sortida d'un <i>polarization scrambler</i> de doble etapa orientats amb $0^\circ$ i $45^\circ$ i modulats amb freqüències $\Omega 2\pi$ i $2\Omega\pi$ . (38).....	57
Fig. 3.28 <i>Polarization Switching</i> de dues branques. El làser es canvia periòdicament entre dos camins, un dels quals alterna la polarització $90^\circ$ .....	58
Fig. 3.29 Exemple d'ús del modulador de polarització com a <i>polarization switching</i> .....	59

## Capítol 4

Fig. 4.1 Modulador de polarització a caracteritzar.....	62
Fig. 4.2 Eixos de polarització d'una fibra PANDA (41).....	63
Fig. 4.3 Fibra PM PANDA amb l'eix lent alineat amb la pestanya del connector (42).....	63
Fig. 4.4 <i>Set-up</i> de mesura de la polarització del làser.....	64
Fig. 4.5 Polarització de sortida del làser.....	65

Fig. 4.6 <i>Set-up</i> de mesura del comportament del modulador amb el polarímetre .....	67
Fig. 4.7 Eixos fibra PM respecte eixos del cristall de Niobat de Liti.....	68
Fig. 4.8 Resultat d'injectar un senyal òptic amb polarització lineal alineada a l'eix de la fibra PM d'entrada del modulador modulat amb un senyal quadrat de freqüència 0.5 Hz i amplitud 6 V.....	70
Fig. 4.9 Evolució del SOP de la llum incident quan modulem amb un senyal sinusoidal amb voltatge $V\pi$ .....	70
Fig. 4.10 Sortida del modulador per a un senyal òptic d'entrada amb polarització horitzontal i senyal elèctric quadrat a 0.5 Hz.....	72
Fig. 4.11 Sortida del modulador per a un senyal òptic d'entrada amb polarització vertical i senyal elèctric sinusoidal a 0.5 Hz .....	73
Fig. 4.12 Evolució del SOP de la llum del senyal de sortida del modulador per a un SOP incident no òptim i senyal de RF una sinusoide d'amplitud $V\pi$ .....	74
Fig. 4.13 <i>Set-up</i> de comprovació del funcionament del modulador de polarització .....	75
Fig. 4.14 Resposta del modulador quan introduïm una seqüència de bits a $f = 1\text{GHz}$ i el senyal òptic està alineat a l'eix de la fibra d'entrada del modulador .....	76
Fig. 4.15 <i>Set-up</i> per a mesurar el valor de $V\pi$ del modulador de polarització ..	77
Fig. 4.16 Senyal detectat a l'oscil·loscopi quan s'aplica un senyal elèctric sinusoidal de voltatge major que $V\pi$ .....	78
Fig. 4.17 Mesura del $V\pi\text{PolSK}$ del modulador en funció de la freqüència .....	79
Fig. 4.18 Esquema de mesura de la resposta en freqüència del modulador de polarització .....	79
Fig. 4.19 Resposta en freqüència del modulador de polarització entre 0 i 20 GHz.....	80
Fig. 4.20 Mesura relativa de la potència elèctrica corresponent al voltatge de mitja ona.....	80
Fig. 4.21 Valor de la potència elèctrica necessària per a provocar màxima variació del SOP de sortida del modulador en funció de la freqüència .....	81

Fig. 4.22 Voltatge de mitja ona de la modulació PolSK òptima en funció de la freqüència des de 0 fins a 20 GHz .....	81
Fig. 4.23 Comparació dels valors del voltatge de mitja ona per a la modulació PolSK òptima ( $V_{\pi PolSK}$ ) calculats mitjançant els esquemes de la fig. 4.15 i la fig. 4.18 .....	82
Fig. 4.24 Set-up de mesura del $V_{\pi}$ del PSK mitjançant les funcions de Bessel	83
Fig. 4.25 Representació gràfica dels dos primers ordres de les funcions de Bessel .....	85
Fig. 4.26 Espectre d'un senyal modulad en fase. Punt on el valor de $J_0 = 0 \Rightarrow \gamma = 2.4$ .....	85
Fig. 4.27 Espectre d'un senyal modulad en fase. Punt on el $J_0 = J_1 \Rightarrow \gamma = 1.435$ .....	86
Fig. 4.28 Funcions de Bessel. Valors per a $\gamma = 1.435$ .....	87
Fig 4.29 Espectre òptic d'un senyal òptic modulad en fase a freqüència de 2 GHz i $P_{RF}$ tal que $J_0 = J_1$ . .....	88
Fig. 4.30 Valor de $V_{\pi}$ en funció de la freqüència del modulador actuant com a modulador de fase en l'eix extraordinari.....	89
Fig. 4.31 Conversió PM $\rightarrow$ IM mitjançant un BPF .....	90
Fig. 4.32 Esquema per a calcular la resposta freqüencial del modulador per a potència elèctrica constant.....	91
Fig. 4.33 Resposta en freqüència del modulador entre 0 i 20 GHz obtinguda amb la conversió FM-IM per a senyal òptic d'entrada alineat a l'eix extraordinari .....	92
Fig. 4.34 Esquema simplificat per a l'anàlisi matemàtica del <i>set-up</i> de la fig. 4.32 .....	92
Fig. 4.35 $H(f_c)$ del modulador per a l'eix extraordinari.....	93
Fig. 4.36 $P_{RF}$ necessària per a provocar un desfasament de $\pi$ per un senyal òptic d'entrada alineada a l'eix extraordinari del modulador.....	94
Fig. 4.37 Voltatge de mitja ona de la modulació PSK de l'eix extraordinari ( $V_{\pi e}$ ) en funció de la freqüència des de 0 fins a 20 GHz .....	94
Fig. 4.38 Comparació dels valors de $V_{\pi e}$ calculats uns mitjançant l'OSA i els altres amb l'analitzador de xarxes .....	95

Fig. 4.39 Comparació dels valors del  $V\pi_{PolSK}$  i del  $V\pi_e$  ..... 96

## Annexos

Fig. A.1 Controlador de polarització utilitzant múltiples *wave plates* amb retard fix i orientació variable en l'espai lliure ..... 106

Fig. A.2 Controlador de polarització utilitzant múltiples *wave plates* amb retard fix i orientació variable de fibra enrotllada. .... 106

Fig. A.3 Controlador de polarització utilitzant guies d'ona electroòptiques de  $\text{LiNbO}_3$ ..... 107

Fig. A.4 Controlador de polarització amb un únic retardador de retard i orientació variable. .... 107

Fig. A.5 Control de polarització amb un *fiber squeezer* giratori ..... 108

Fig. A.6 Múltiples *wave plates* amb orientació fixa i retard variable, aproximació en l'espai lliure..... 108

Fig. A.7 Múltiples *wave plates* amb orientació fixa i retard variable, realització completament en fibra ..... 109

Fig. A.8 Controlador de polarització basat en rotadors de faraday..... 109

Fig. A.9 Fotografia del *Fiber Polarization Controller* construït ..... 116



# Índex de taules

Taula 2.1 Exemples de SOPs expressats amb vectors de Jones .....	21
Taula 2.2 Exemples de dispositius que modifiquen el SOP expressats amb matrius de Jones .....	23
Taula 2.3 Exemples de SOPs expressats amb vectors de Stokes.....	26
Taula 2.4 Exemples de dispositius que modifiquen el SOP expressats amb matrius de Muller .....	27
Taula 2.5 Relació entre els punts característics de l'esfera de Poincaré i la seva polarització .....	29



# Acrònims

APD	Avalanche Photodiodes
ASK	Amplitude Shift Keying
BPF	Band Pass Filter
DOP	Degree of Polarization
DPSK	Diferencial Phase Shift Keying
DSL	Digital Subscriber Line
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
FM	Frequency Modulation
FPC	Fiber Polarization Controller
FSK	Frequency Shift Keying
FTTH	Fiber To The Home
GCO	Grup de Comunicacions Òptiques
HWP	Half Wave Plate
IM	Intensity Modulation
LED	Díode electroluminiscent
MZ	Mach-Zehnder
OOK	On-Off Keying
OSA	Optical Spectrum Analyzer
PBS	Polarization Beam Splitter
PDG	Polarization Depends Gain
PDL	Polarization Depent Loss
PDM	Polarization Depends Modulations
PM	Phase Modulation
PMD	Polarization Mode Dispersion

PMF	Polarization Maintaining Fiber
PoISK	Polarization Shift Keying
PRBS	Pseudo Random Bit Sequence
PSK	Phase Shift Keying
QWP	Quarter Wave Plate
RF	Radio Frequency
SMF	Single Mode Fiber
SOP	State of Polarization
UPC	Universitat Politècnica de Catalunya

