

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>17</b>
1.1. Sistemas de comunicaciones ópticos . . . . .	17
1.1.1. Primera generación . . . . .	20
1.1.2. Segunda generación . . . . .	21
1.1.3. Tercera generación . . . . .	21
1.1.4. Tecnología de multiplexado por división de longitud de onda	21
1.2. Justificación del tema de tesis . . . . .	22
1.2.1. Métodos de modulación de un láser . . . . .	23
1.2.2. Antecedentes del uso de la modulación directa en un diodo láser . . . . .	24
1.3. Objetivos . . . . .	25
<b>2. Física de los láseres de semiconductor</b>	<b>27</b>
2.1. Materiales semiconductores . . . . .	27
2.1.1. La función de probabilidad de Fermi-Dirac . . . . .	29
2.1.2. Semiconductores extrínsecos . . . . .	31
2.1.3. Juntura P-N . . . . .	34
2.1.4. Estructura del láser . . . . .	38
2.2. Comportamiento Cuántico . . . . .	41
2.2.1. Factor de confinamiento . . . . .	43
2.2.2. Inversión de Poblaciones . . . . .	44
2.2.3. Recombinaciones no radiativas . . . . .	45
2.3. Resonador . . . . .	47
2.4. Ganancia . . . . .	48
2.5. Láser Distributed Feedback (DFB) . . . . .	51
<b>3. Modelo Matemático de un láser de semiconductor</b>	<b>53</b>
3.1. Ecuación de estado de densidad de portadores . . . . .	53
3.1.1. Inyección de portadores . . . . .	54
3.1.2. Recombinación de portadores: Emisión espontánea y no radiativa . . . . .	55
3.1.3. Emisión estimulada . . . . .	55
3.2. Ecuación de estado de densidad de fotones . . . . .	56
3.2.1. Emisión espontánea . . . . .	56

3.2.2.	Pérdidas . . . . .	57
3.2.3.	Emisión estimulada . . . . .	58
3.3.	Ecuación de estado de la fase . . . . .	58
3.4.	Potencia de salida . . . . .	60
3.5.	Características de modulación . . . . .	61
3.6.	<i>Chirp</i> del láser . . . . .	63
3.6.1.	<i>Chirp</i> Transitorio . . . . .	65
3.6.2.	<i>Chirp</i> Adiabático . . . . .	66
<b>4.</b>	<b>Resolución y validación de las ecuaciones de estado</b>	<b>69</b>
4.1.	Método numérico de Runge-Kutta de cuarto orden . . . . .	69
4.2.	Implementación en LabVIEW™ . . . . .	71
4.2.1.	Implementación del simulador . . . . .	72
4.2.2.	Señal de entrada . . . . .	72
4.2.3.	Modulación de la corriente . . . . .	75
4.2.4.	Resolución del método numérico . . . . .	77
4.3.	Interfaz de usuario . . . . .	79
4.3.1.	Parámetros del láser . . . . .	79
4.3.2.	Valores de la corriente y de tiempo. . . . .	80
4.3.3.	Parámetros de la señal de entrada. . . . .	80
4.3.4.	Datos de salida . . . . .	81
4.3.5.	Desempeño del simulador . . . . .	82
4.4.	Validación del simulador . . . . .	82
4.4.1.	Láser con <i>chirp</i> adiabático predominante a 2.5 Gbps . . . . .	84
4.4.2.	Láser con <i>chirp</i> transitorio predominante a 2.5 Gbps . . . . .	86
4.4.3.	Láser a 10 Gbps . . . . .	89
4.4.4.	Láser de <i>chirp</i> equilibrado . . . . .	92
4.4.5.	Respuesta de la potencia óptica respecto a la corriente inyectada . . . . .	94
<b>5.</b>	<b>Desempeño de un sistema óptico</b>	<b>101</b>
5.1.	Características de transmisión . . . . .	101
5.1.1.	Perfiles de dispersión de distintas fibras ópticas . . . . .	104
5.1.2.	Interacción del <i>chirp</i> con la dispersión . . . . .	105
5.1.3.	Pulsos ópticos propagándose por una fibra óptica . . . . .	107
5.1.4.	Factor Q . . . . .	108
5.2.	Esquema del sistema . . . . .	111
5.3.	Análisis de la propagación de pulsos ópticos con <i>chirp</i> . . . . .	113
5.3.1.	Desempeño del láser LMD-1 . . . . .	113
5.3.2.	Desempeño del láser LMD-2 . . . . .	116
5.3.3.	Desempeño del láser LMD-3 . . . . .	121
5.3.4.	Desempeño del láser LMD-4 . . . . .	124
5.4.	Resultados . . . . .	127
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>131</b>

<b>A. Parámetros de los láseres de semiconductor</b>	<b>133</b>
A.1. Parámetros del láser LMD-1 . . . . .	133
A.2. Parámetros del láser LMD-2 . . . . .	134
A.3. Parámetros del láser LMD-3 . . . . .	134
A.4. Parámetros del láser LMD-4 . . . . .	135
<b>B. Parámetros de las fibras ópticas</b>	<b>137</b>
B.1. Parámetros de la fibra G.652 . . . . .	137
B.2. Parámetros de la fibra G.655 . . . . .	138
<b>C. Diagrama de ojo.</b>	<b>139</b>



# Índice de figuras

1.1. Semáforo óptico (izquierda) y las rutas que se crearon en Francia para este sistema de comunicaciones (derecha).1795 Librería del Instituto Smithsonian [19] . . . . .	18
1.2. Atenuación en la fibra óptica vs longitud de onda y la ubicación de las ventanas de transmisión . . . . .	20
1.3. Configuraciones de modulación de la señal óptica. (a) Usando un modulador externo y (b) utilizando la modulación directa . . . . .	23
2.1. Arreglo cristalino de átomos de silicio . . . . .	28
2.2. Bandas de energía en semiconductor con una banda prohibida directa [1] . . . . .	29
2.3. Distribución de Fermi-Dirac a diferentes temperaturas [30] . . . . .	30
2.4. Estructura cristalina de un semiconductor tipo N [30] . . . . .	32
2.5. Nivel de energía de Fermi para semiconductor tipo N . . . . .	32
2.6. Estructura cristalina de un semiconductor tipo P [30] . . . . .	33
2.7. Nivel de energía de Fermi para semiconductor tipo P . . . . .	34
2.8. Gráfica del comportamiento de la potencia óptica emitida por un láser DFB contra la corriente inyectada (figura obtenida mediante el simulador desarrollado en esta tesis) . . . . .	35
2.9. Niveles de energía de Fermi para (a) <i>Homojunction</i> con y sin voltaje aplicado, (b) <i>Double heterojunction</i> con y sin voltaje aplicado . . . . .	35
2.10. Características de los principales parámetros en una doble heteroestructura . . . . .	37
2.11. Estructura de un láser de semiconductor de área extensa . . . . .	39
2.12. Vista transversal de un láser de semiconductor con ganancia guiada . . . . .	40
2.13. Vistas transversales de dos estructuras de láseres de semiconductor con índice de refracción guiado: (a) de guía de onda acanalado y (b) de heteroestructura enterrada . . . . .	41
2.14. Emisión Espontánea . . . . .	42
2.15. Absorción . . . . .	42
2.16. Emisión Estimulada . . . . .	43
2.17. Esquema representativo del factor de confinamiento con un haz Gaussiano, teniendo de dimensiones $w$ y $d$ . . . . .	43

2.18. (a) Densidad de población normal, (b) Inversión de población cuando se aplica una fuente de bombeo . . . . .	45
2.19. Figura representativa de una cavidad láser . . . . .	47
2.20. Comportamiento de la ganancia respecto a la ubicación en la cavidad . . . . .	49
2.21. (a) Espectro de ganancia a diferentes valores de densidad de poblaciones N, (b) Variación del pico de $g_p$ con N, se observa un comportamiento casi lineal en la parte alta de la ganancia [2] . .	51
2.22. (a) Estructura longitudinal general de un Láser DFB, (b) cambio del índice de refracción a lo largo de la estructura . . . . .	52
3.1. Relación del cambio del índice de refracción, ganancia del material y densidad de portadores [26] . . . . .	60
3.2. Modulación directa de un láser [39] . . . . .	62
3.3. Gráfica de la simulación de un láser trabajando en onda continua	64
3.4. Gráficas de potencia óptica y <i>chirp</i> de un láser con <i>chirp</i> transitorio	65
3.5. Gráficas de potencia óptica y <i>chirp</i> de un láser con <i>chirp</i> adiabático	67
4.1. Comparación entre la señal obtenida con el submódulo PRBS (a) y al muestrearla (b). . . . .	73
4.2. Gráfica de una señal Gaussiana normalizada . . . . .	74
4.3. Comparación entre las señales RZ y la filtrada . . . . .	75
4.4. Curva de potencia vs. corriente . . . . .	76
4.5. Icono que representa el VI que contiene las ecuaciones diferenciales a resolver. . . . .	77
4.7. Módulo de entrada de parámetros del láser . . . . .	79
4.8. Módulo de ingreso de valores de corrientes y de tiempo. . . . .	80
4.9. Módulo con los parámetros de la señal de entrada. . . . .	81
4.10. Esquema estándar de intercambio de datos. . . . .	81
4.11. Comportamiento de la potencia para el láser adiabático LMD-1. Resultados publicados (superior) [44] y los obtenidos con nuestro simulador (inferior) . . . . .	85
4.12. Comportamiento del <i>chirp</i> para el láser adiabático LMD-1. Resultados publicados (superior) [44] y los obtenidos con nuestro simulador (inferior) . . . . .	86
4.13. Comportamiento de la potencia para el láser transitorio LMD-2. Resultados publicados (superior) [44] y los obtenidos con nuestro simulador (inferior) . . . . .	88
4.14. Comportamiento del <i>chirp</i> para el láser transitorio LMD-2. Resultados publicados (superior) [44] y los obtenidos con nuestro simulador (inferior) . . . . .	89
4.15. Comportamiento de la potencia para el láser transitorio LMD-3 a 10 Gbps. Resultados publicados (superior) [44] y los obtenidos con nuestro simulador (inferior) . . . . .	90

4.16. Comportamiento del <i>chirp</i> para el láser transitorio LMD-3 a 10 Gbps. Resultados publicados (superior) [44] y los obtenidos con nuestro simulador (inferior) . . . . .	91
4.17. Comportamiento de la potencia óptica para el láser de chirp equilibrado LMD-4. Resultados publicados (superior) [16] y los obtenidos con nuestro simulador (inferior) . . . . .	93
4.18. Comportamiento del <i>chirp</i> para el láser de chirp equilibrado LMD-4. Resultados publicados (superior) [16] y los obtenidos con nuestro simulador (inferior) . . . . .	94
4.19. Gráficas obtenidas con el simulador para la respuesta de la potencia óptica vs la corriente de los láseres estudiados . . . . .	95
4.20. Gráficas de los resultados publicados para los mismos láseres estudiados . . . . .	96
4.21. Gráficas de potencia vs corriente en decibeles tanto de las publicaciones (a,c,e) como de nuestro simulador (b,d,f,g). . . . .	98
4.6. Método de Runge-Kutta implementado en LabVIEW . . . . .	100
5.1. Dispersión cromática . . . . .	102
5.2. Efectos de la dispersión en la propagación de una cadena de pulsos ópticos . . . . .	103
5.3. Interacción de las componentes espectrales con el tipo de dispersión de la fibra . . . . .	103
5.4. Perfiles de dispersión de las fibras SMF y NZ-DSF [35] . . . . .	104
5.5. Factor de ensanchamiento para $\beta_2 = 2$ y diferentes valores de C .	106
5.6. Efectos de la interacción de la dispersión para pulsos con diferente tipo de <i>chirp</i> , para una fibra G.652 (superior) y G.655 (inferior)	108
5.7. (a) Diagrama de ojo y (b) Distribución Gaussiana de potencia para los bits en 1 y 0 . . . . .	109
5.8. Bit Error Rate vs Factor Q . . . . .	110
5.9. Esquema del sistema óptico a estudiar . . . . .	112
5.10. Comportamiento del factor Q del láser LMD-1 operando a 2.5 Gbps	114
5.11. Diagramas de ojo para la señal del láser LMD-1: a la salida del láser (a), al propagarse por una fibra G.655 300 [km] (b) y 950 [km] (c); y al propagarse por una fibra G.652 300[km] (d) y 950[km] (e) . . . . .	115
5.12. Comparativa del efecto de la magnitud de la dispersión en una señal con chirp adiabático con el valor $D = 17$ (a) y $D = -17$ (b)	116
5.13. Comportamiento del factor Q del láser LMD-2 operando a 2.5 Gbps	117
5.14. Diagramas de ojo para la señal del láser LMD-2: a la salida del láser (a), al propagarse por una fibra G.652 100 [km] (b) y 300 [km] (c); y al propagarse por una fibra G.655 100[km] (d) y 300[km] (e) . . . . .	119
5.15. Comparativa del efecto del signo de la dispersión en una señal con <i>chirp</i> transitorio con el valor $D = 17$ (a) y $D = -17$ (b) . . .	120
5.16. Comportamiento del factor Q del láser LMD-3 operando a 10 Gbps	121

5.17. Diagramas de ojo para la señal del láser LMD-3: a la salida del láser (a), al propagarse por una fibra G.652 25 [km] (b) y 140 [km] (c); y al propagarse por una fibra G.655 25[km] (d) y 140[km] (e)	123
5.18. Comportamiento del factor Q del láser LMD-4 operando 2.5 Gbps	125
5.19. Diagramas de ojo para la señal del láser LMD-4: a la salida del láser (a), al propagarse por una fibra G.652 100 [km] (b) y 350 [km] (c); y al propagarse por una fibra G.655 100[km] (d) y 350[km] (e)	126
C.1. Diagrama de ojo con sus parámetros más importantes	139



# Índice de cuadros

2.1. Elementos semiconductores por grupo . . . . .	31
4.1. Tiempos de ejecución promedio del simulador . . . . .	82
4.2. Parámetros de <i>chirp</i> para los diferentes láseres estudiados . . . . .	83
4.3. Comparativo de las corrientes umbral teórica (primera columna), los resultados de nuestras simulaciones (segunda columna) y las que se encuentran publicadas en los artículos (tercera columna) . . . . .	97
A.1. Parámetros LMD-1 . . . . .	133
A.2. Parámetros LMD-2 . . . . .	134
A.3. Parámetros LMD-3 . . . . .	134
A.4. Parámetros LMD-4 . . . . .	135
B.1. Parámetros de la fibra G.652 . . . . .	137
B.2. Parámetros de la fibra G.655 . . . . .	138

