

Índice general

1. Introducción	17
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
2. Física de los láseres de semiconductor	27
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
3. Modelo Matemático de un láser de semiconductor	53
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
4.	Resolución y validación de las ecuaciones de estado	69
4.1.	Método numérico de Runge-Kutta de cuarto orden	69
4.2.	Implementación en LabVIEW TM	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
5.	Desempeño de un sistema óptico	101
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
6.	Conclusiones	131

A. Parámetros de los láseres de semiconductor	133
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. Parámetros de las fibras ópticas	137
B.1. Parámetros de la fibra G.652	137
B.2. Parámetros de la fibra G.655	138
C. Diagrama de ojo.	139

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

