



Thiago Ferreira da Silva

**Transmissão óptica de bits quânticos codificados em
frequência com sincronismo por WDM**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Jean Pierre von der Weid

Rio de Janeiro
março de 2008



Thiago Ferreira da Silva

Transmissão óptica de bits quânticos codificados em frequência com sincronismo por WDM

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dr. Jean Pierre von der Weid

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações / PUC-Rio

Dr. Guilherme Penello Temporão

Centro de Estudos em Telecomunicações / PUC-Rio

Dr. Paulo Henrique Souto Ribeiro

UFRJ

Dr. Luiz Carlos Guedes Valente

Gávea Sensors

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 06 de março de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Thiago Ferreira da Silva

Graduado em Engenharia de Telecomunicações pela Universidade Católica de Petrópolis, Rio de Janeiro, em dezembro de 2005, iniciou o mestrado em 2006. Suas principais áreas de interesse envolvem comunicações quânticas, sistemas e dispositivos ópticos.

Ficha Catalográfica

Ferreira da Silva, Thiago

Transmissão óptica de bits quânticos codificados em frequência com sincronismo por WDM / Thiago Ferreira da Silva; orientador: Jean Pierre von der Weid. – 2008.

128 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. QKD. 3. Distribuição quântica de chaves. 4. Criptografia quântica. 5. Codificação em frequência. 6. Protocolo BB84. I. Weid, Jean Pierre von der. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

À minha Mãe, ao Ayres e ao meu Avô Ferreira por me apoiarem incondicionalmente de todas as formas;

À Flavia pela paciência, incentivo e confiança mesmo à distância;

À Thaís pela compreensão e carinho;

Ao professor Jean Pierre por me guiar pelos meandros do conhecimento;

Aos colegas e colaboradores do Laboratório de Optoeletrônica Amália, Andy, Claiton, Daniela, Djeisson, Douglas, Giancarlo, Guilherme, Gustavo, Janaína, Marçal, Rogério e Temporão;

Novamente ao camarada Giancarlo por estar sempre disposto a ajudar e cheio de paciência, desde o início;

Ao amigo Tarcísio por me abrigar naquele momento crucial. Não tenho palavras para agradecer;

Aos professores e amigos Bessa, Cristina e Erasmus que, cada um de sua forma, me incentivaram e motivaram a seguir na nossa área de telecomunicações;

Ao Alexandre do grupo de Sensores à Fibra da PUC-Rio pela presteza e boa vontade em gravar as redes de Bragg;

Ao CPTI pela confecção da caixa de alumínio para acondicionar o interferômetro;

Ao Nicolas Gisin do Grupo de Física Aplicada da Universidade de Genebra pelo empréstimo do SPAD;

Ao CNPq pelo apoio financeiro no primeiro ano do curso;

À FAPERJ pelo apoio financeiro no segundo ano do curso.

Resumo

Ferreira da Silva, Thiago; von der Weid, Jean Pierre. **Transmissão óptica de bits quânticos codificados em frequência com sincronismo por WDM.** Rio de Janeiro, 2008. 128p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A criptografia quântica se apresenta como uma área relativamente nova e interdisciplinar que, fundamentada nas leis da mecânica quântica, promete solucionar o grande desafio da criptografia simétrica clássica atual, a distribuição de chaves. A distribuição quântica de chaves provê comunicação absolutamente segura entre duas partes, possibilitando o compartilhamento de um segredo, que será utilizado na posterior encriptação da mensagem. Esta dissertação relata a implementação física experimental de um sistema óptico de distribuição quântica de chaves com codificação em frequência por dupla-modulação em amplitude e fase e sincronização por multiplexação no domínio do comprimento de onda. São introduzidos os conceitos teóricos básicos necessários ao desenvolvimento do tema e apresentadas medições de caracterização dos principais componentes do sistema, bem como resultados de medidas sistêmicas clássicas e quânticas.

Palavras-chave

QKD; distribuição quântica de chaves; criptografia quântica; codificação em frequência; protocolo BB84.

Abstract

Ferreira da Silva, Thiago; von der Weid, Jean Pierre. **Optical transmission of frequency-coded quantum bits with WDM synchronization.** Rio de Janeiro, 2008. 128p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The quantum cryptography rises as a relatively new and interdisciplinary area that, grounded in the quantum mechanics laws, promises to solve the major challenge in the actual symmetric classical cryptography, the key distribution. The quantum key distribution enables absolutely secure communication between two parts, making them able to share a secret that will be used in the posterior message encryption. This dissertation reports the experimental physical implementation of an optical quantum key distribution system with frequency coding by amplitude and phase double-modulation process and wavelength-division multiplexing synchronization. The mean theoretical foundations are briefly introduced and the characterization measurements of the most important devices are shown, as like results from systemic classical and quantum measurements.

Keywords

QKD; quantum key distribution; quantum cryptography; frequency coding; BB84 protocol.

Sumário

| | |
|---|----|
| 1. Introdução | 17 |
| 2. Criptografia clássica | 20 |
| 2.1. Chave pública | 20 |
| 2.2. Chave privada | 21 |
| 3. Criptografia quântica | 23 |
| 3.1. Qubits | 24 |
| 3.2. Teorema da não-clonagem | 25 |
| 3.3. Emaranhamento e o paradoxo EPR | 26 |
| 3.4. Distribuição quântica de chaves | 28 |
| 3.4.1. Protocolo BB84 | 29 |
| 3.4.2. Protocolo B92 | 31 |
| 3.4.3. Protocolo Ekert 1991 | 32 |
| 3.4.4. Outros protocolos | 34 |
| 3.4.5. Estimativa da taxa de erro quântica | 36 |
| 3.4.6. Correção de erro | 37 |
| 3.4.7. Amplificação de privacidade | 38 |
| 3.4.8. Espionagem | 39 |
| 4. Elementos de QKD | 41 |
| 4.1. Geração de qubits | 41 |
| 4.1.1. Fontes de fótons únicos com pontos quânticos | 42 |
| 4.1.2. Laser altamente atenuado | 42 |
| 4.1.3. Conversão paramétrica descendente | 46 |
| 4.2. Detecção de qubits - SPAD | 47 |
| 4.2.1. Extinção passiva, ativa e gatilhada | 47 |
| 4.2.2. Circuito subtrator | 49 |
| 4.2.3. Características relevantes | 50 |
| 4.3. Tipos de codificação | 53 |
| 4.3.1. Codificação por polarização | 53 |
| 4.3.2. Codificação por fase | 54 |
| 4.3.3. Codificação por frequência | 56 |
| 4.3.3.1. AM-AM ou PM-PM | 57 |
| 4.3.3.2. AM-PM ou PM-AM | 58 |
| 4.4. Considerações sobre o canal | 60 |
| 4.5. QBER sistêmica | 61 |

| | |
|---|-----|
| 5. Sistema proposto | 64 |
| 5.1. Sistema implementado | 65 |
| 5.2. AM-PM | 67 |
| 5.2.1. Caracterização | 69 |
| 5.3. Detector de fótons únicos | 71 |
| 5.3.1. Caracterização | 71 |
| 5.4. Filtro de Fabry-Perot | 72 |
| 5.4.1. Caracterização | 76 |
| 5.5. Interferômetro de Mach-Zehnder | 79 |
| 5.5.1. Caracterização | 83 |
| 5.6. Multiplexador e demultiplexador | 86 |
| 5.6.1. Caracterização | 86 |
| 5.7. Modulador QPSK | 88 |
| 5.7.1. Caracterização | 89 |
| 6. Procedimentos de medição e resultados sistêmicos | 94 |
| 6.1. Medições com excursão de frequência | 94 |
| 6.1.1. Medições clássicas | 94 |
| 6.1.2. Medições quânticas | 101 |
| 6.2. Medições com chaveamento de fase | 103 |
| 6.2.1. Medições clássicas | 104 |
| 6.2.2. Medições quânticas | 112 |
| 6.3. Medições com enlace de sincronismo | 114 |
| 6.3.1. Medições clássicas | 115 |
| 6.3.2. Medições quânticas | 117 |
| 7. Conclusões | 122 |
| 8. Referências bibliográficas | 126 |

Lista de figuras

- Figura 1:** Bases não-ortogonais (azul e vermelha) compostas por dois estados ortogonais em um espaço de Hilbert, utilizadas no protocolo BB84. 29
- Figura 2:** Probabilidade $P(n, \mu)$ de se encontrar n fótons em pulsos contendo μ fótons em média, conforme a distribuição de Poisson da eq. 4.1. 43
- Figura 3:** Probabilidade de pulsos vazios (barras azuis) e não-vazios (barras amarelo-claro) para diversos valores de μ . 44
- Figura 4:** Probabilidade de pulsos não-vazios conterem apenas um (barras vermelhas) ou mais fótons (barras verde-claro). 45
- Figura 5:** Circuitos de polarização do SPAD no modo passivo (a) e no modo gatilhado (b). 48
- Figura 6:** Circuito de compensação de capacitância para operação do SPAD no modo Geiger. 49
- Figura 7:** Potência efetiva de ruído (NEP) em função da temperatura para um fotodiodo de InGaAs/InP operando em modo Geiger [17]. 52
- Figura 8:** Configuração do sistema de codificação por polarização em que Alice e Bob escolhem suas bases aleatoriamente utilizando, por exemplo, uma célula de Pockels [9]. Dependendo da medição, o fóton emergirá de uma das saídas do divisor de feixes por polarização (PBS), atingindo um dos detectores de fótons únicos (SPD), o que acusará o bit de informação. 53
- Figura 9:** Configuração do sistema de codificação por fase com interferômetro de Mach-Zehnder inteiro (a) e colapsado em dois (b) [9]. A escolha das bases é feita através dos moduladores de fase (PM). Dependendo da combinação, o fóton atingirá um dos dois detectores de fótons únicos (SPD), acusando o bit. 55
- Figura 10:** Sistema de distribuição quântica de chaves por codificação em frequência. Caso o protocolo utilizado seja B92, Bob deve substituir o multiplexador (MUX) e o filtro rejeita-faixa (FRF) por um filtro passa faixa centrado em uma das bandas laterais e precisará de apenas um

dos detectores de fótons únicos (SPD).

57

Figura 11: Sistema experimental proposto para a transmissão de qubits codificados em frequência com sincronização. A codificação é obtida através da dupla-modulação em amplitude e fase. A distinção entre os bits depende da separação espectral proporcionada pelo filtro rejeita-faixa, que filtrará a portadora óptica, e pelo multiplexador (MUX), que fará a separação das bandas laterais por frequência, entregando-as aos detectores de fótons únicos (SPD).

64

Figura 12: Sistema de transmissão de qubits codificados em frequência com sincronização por WDM implementado experimentalmente. O canal de sincronismo, em comprimento de onda diferente do canal quântico, é acrescentado ao sistema pelo multiplexador e separado pelo demultiplexador, possibilitando a reutilização do sinal de rádio-freqüência na decodificação dos qubits. A portadora óptica é filtrada pelos filtros de Fabry-Perot em série (FFP) e as bandas laterais são separadas pelo interferômetros de Mach-Zehnder (IMZ), sendo entregues, através de uma chave óptica (Ch) ao detector de fótons únicos (SPAD) ou ao analisador de espectro óptico (OSA).

66

Figura 13: Configuração da dupla-modulação AM-PM para supressão de banda lateral do sinal óptico com variação de fase (a) por defasamento do sinal de RF e (b) por variação da frequência (b). Nesta última, como os caminhos óptico e elétrico são fixos, a variação no comprimento de onda do sinal fará com que as fases se alterem em um determinado ponto fixo do sistema, mais especificamente no modulador PM.

68

Figura 14: Espectros obtidos com o sistema AM-PM da figura 13b com variação da rádio-freqüência entre 10303MHz e 10308MHz com passos de 1MHz. A conseqüente variação de fase se deve ao fato de o caminhos óptico e elétrico se manterem fixos, enquanto o comprimento de onda do sinal varia.

70

Figura 15: Contagem de fótons em função da potência óptica e do número médio de fótons por janela de gatilho de 2,5ns com taxa de repetição de 100kHz.

71

Figura 16: Simulação dos espectros de transmissão (superior) e de reflexão (inferior) típicos de um filtro de Fabry-Perot em função do comprimento de onda, para diferentes valores de reflexão dos espelhos (legenda), assumidos como iguais, índice de refração da fibra igual a 1,5, ângulo

de incidência da luz igual a zero e espaçamento calculado de forma que os picos distem de 20GHz. 73

Figura 17: Refletividade típica de uma rede de Bragg em função do desvio do comprimento de onda de operação em relação ao λ_B (*detuning*) [16]. 74

Figura 18: Filtro de Fabry-Perot com controlador manual de polarização à entrada, circulador óptico, estabilização térmica e isolador óptico. O sistema será referido como FFP e as saídas de reflexão e de transmissão serão nomeadas como R e T, respectivamente. 75

Figura 19: Estabilização térmica do filtro de Fabry-Perot. De baixo para cima: caixa de isopor, termistor e fibra com as redes (impressões azuis), placa de alumínio, Peltiers e dissipador térmico. 76

Figura 20: Espectros de transmissão da entrada para a saída de reflexão (a e b) e para a saída de transmissão (c e d) do conjunto FFP₁. A coluna da esquerda mostra a caracterização em um intervalo de 5nm e, a da direita, o detalhamento dos picos centrais do espectro. 77

Figura 21: Transmissão da entrada para a saída R do conjunto FFP₂. 78

Figura 22: Transmissão da entrada para a saída R do conjunto FFP₂ com a temperatura entre 28 e 26 °C, mostrando, na mesma escala horizontal, a sintonização espectral de aproximadamente 25pm/°C. 79

Figura 23: Interferômetro de Mach-Zehnder a partir de dois acopladores de 3dB. O defasamento do sinal induzido pela diferença de caminhos ópticos entre os braços L₁ e L₂ determina o padrão de interferência do dispositivo. 80

Figura 24: Interferômetro de Mach-Zehnder com controlador manual de polarização e estabilização térmica. O sistema será referido como IMZ e nomeadas as saídas complementares como S_A e S_B. 82

Figura 25: Estabilização térmica do interferômetro de Mach-Zehnder. De baixo para cima: caixa de isopor, caixa de alumínio, IMZ e termistor, tampa de alumínio, Peltiers e dissipador térmico. 83

Figura 26: Transmissão do interferômetro de Mach-Zehnder da entrada para as saídas S_A (a e b) e S_B (c e d). A coluna da esquerda mostra a caracterização em um intervalo espectral de 5nm, enquanto a coluna da direita mostra o detalhamento do trecho central de 0,5nm do espectro, mostrando que ambas são complementares. 84

Figura 27: Transmissão da entrada para a saída S_A do IMZ com a

| | |
|---|-----|
| temperatura entre 22 e 20 °C mostrando, na mesma escala horizontal, a sintonização espectral de aproximadamente 12,5 pm/°C. | 85 |
| Figura 28: Transmissão da porta comum para as demais portas dos MUX _A (a-d) e MUX _B (e-h). | 87 |
| Figura 29: Diagrama de blocos de um modulador QPSK. O sinal de entrada é dividido e defasado em 90°. Cada parte tem sua amplitude chaveada de forma discreta pelos sinais de controle, sendo recombinaadas antes de deixarem o dispositivo, resultando em uma constelação com quatro possibilidades. | 88 |
| Figura 30: Constelação da modulação QPSK com os respectivos níveis lógicos TTL solicitados pelo modulador utilizado. | 89 |
| Figura 31: Medição das fases do modulador QPSK _A ajustado para 0, $\pi/2$, π e $3\pi/2$ rad. | 90 |
| Figura 32: Desvio de fase do modulador QPSK _A em relação à fase zero. | 90 |
| Figura 33: Desvio de fase do modulador QPSK _B em relação à fase zero. | 91 |
| Figura 34: Perda de inserção do modulador QPSK _A para suas quatro fases. | 92 |
| Figura 35: Perda de inserção do modulador QPSK _B para suas quatro fases. | 92 |
| Figura 36: Montagem da seção de modulação em amplitude (a) e da seção de modulação em fase (b). | 95 |
| Figura 37: Montagem do sistema de dupla modulação AM-PM. | 95 |
| Figura 38: Sistema AM-PM com filtragem da portadora óptica na recepção por (a) um filtro e (b) por dois filtros em série. | 96 |
| Figura 39: Sistema AM-PM com filtragem da portadora óptica e separação das bandas laterais na recepção, com seleção de leitura pela chave óptica. | 97 |
| Figura 40: Espectros ópticos do sistema AM-PM para frequência de RF variando de 10303 a 10308MHz, respectivamente de (a) a (f). Observa-se a supressão da banda lateral direita na figura (a), enquanto que a banda lateral esquerda é suprimida na figura (f). As demais figuras apresentam estados intermediários. | 98 |
| Figura 41: Espectros ópticos do sinal AM-PM passando pelo FFP ₁ , com RF igual a 10303MHz (a) e 10308MHz (b), com supressão da portadora óptica. | 99 |
| Figura 42: Espectro óptico do sinal AM-PM passando pelos FFP ₁ e FFP ₂ , com (a) banda lateral direita suprimida, (b) banda lateral esquerda suprimida e (c) apenas portadora óptica filtrada (sinal não modulado). | 100 |

- Figura 43:** Espectros ópticos às saídas S_A e S_B do IMZ para RF em 10303MHz (a e b) e 10308MHz (c e d). 101
- Figura 44:** Montagem experimental do sistema com excursão de frequência para medições no regime quântico. 102
- Figura 45:** Contagem de fótons para as duas portas de saída do sistema com excursão de RF e a contagem de escuro. Nota-se maior razão de contraste na frequência de 10,308GHz. Círculos: saída B; quadrados: saída A; triângulos: escuro. 103
- Figura 46:** Sistema compartilhando o mesmo gerador de RF com adição dos moduladores QPSK. 104
- Figura 47:** Espectros ópticos do sistema AM-PM com os moduladores QPSK em suas 16 possíveis combinações de fase. (a), (d), (f), (g), (j) (l), (n) e (q) representam bases compatíveis e (b), (c), (e), (h), (i), (m), (o) e (p) representam bases incompatíveis. 107
- Figura 48:** Comparativo da supressão de portadora obtida com apenas um FFP (a, b, c) e com dois FFP em série (d, e, f). 108
- Figura 49:** Espectros ópticos nas saídas S_A (a até h) e S_B (i até q) do sistema AM-PM com dois FFP e IMZ para as possíveis combinações de fase dos moduladores QPSK. 111
- Figura 50:** Montagem experimental para medições no regime quântico com os moduladores QPSK. 112
- Figura 51:** Contagem para as combinações de fase entre Alice (0 ou π) e Bob (0 ou $\pi/2$) do sistema com os moduladores, para cada saída do IMZ.. Losangos vazios: saída B; círculos cheios: saída A; linha tracejada: escuro. 113
- Figura 52:** Contagem para as combinações de fase entre Alice ($\pi/2$ ou $3\pi/2$) e Bob (0 ou $\pi/2$) do sistema com os moduladores, para cada saída do IMZ. Losangos vazios: saída B; círculos cheios: saída A; linha tracejada: escuro. 113
- Figura 53:** Fotografia da montagem experimental completa sobre a bancada de trabalho. 115
- Figura 54:** Diagrama de blocos do sistema completo com sincronismo por WDM. 116
- Figura 55:** Espectros ópticos do sistema com sincronismo por WDM. Pode-se observar (a) o alargamento espectral do sinal de RF a ser utilizado por Bob devido ao ruído de seus amplificadores de RF. Também se

vêm a saída dos FFP para os casos de (b) medição na base correta e (c) na base errada. 117

Figura 56: Configuração para a verificação de interferência co-canal entre o canal de sincronismo e o quântico. 118

Figura 57: Medição da interferência do sinal de sincronismo em relação ao canal quântico para diferentes valores de potência (triângulo) e contagens de escuro (linhas tracejadas). 118

Figura 58: Contagem para as combinações de fase entre Alice (0 ou π) e Bob (0 ou $\pi/2$) do sistema com os moduladores QPSK e com o canal de sincronismo, para cada saída do IMZ. Losangos vazios: saída B; círculos cheios: saída A; linha tracejada: escuro. 119

Figura 59: Contagem para as combinações de fase entre Alice ($\pi/2$ ou $3\pi/2$) e Bob (0 ou $\pi/2$) do sistema com os moduladores QPSK e com o canal de sincronismo, para cada saída do IMZ. Losangos vazios: saída B; círculos cheios: saída A; linha tracejada: escuro. 120

Figura 60: Sugestão de sistema para continuação do trabalho. 125

Lista de tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 1: Possibilidades de combinações de bases para qubits codificados segundo o protocolo BB84. | 30 |
| Tabela 2: Possibilidades de combinações de bases para qubits codificados segundo o protocolo B92. | 31 |
| Tabela 3: Combinações de fases para o esquema de codificação por frequência com protocolo B92. | 58 |
| Tabela 4: Combinações de fase para o esquema de codificação por frequência com protocolo BB84. Após a decodificação, os qubits podem assumir os estados referentes às bandas laterais $ \Omega \pm \omega 0\rangle$ com probabilidade (P) igual a 0, 0,5 ou 1. | 60 |
| Tabela 5: Desvios de fase dos moduladores QPSK _A e QPSK _B em relação à fase zero para frequência de operação de 10308MHz. | 91 |
| Tabela 6: Perda de inserção dos moduladores QPSK _A e QPSK _B na frequência de operação de 10,308GHz. | 93 |
| Tabela 7: Visibilidade das duas saídas do sistema com chaveamento de fase medida e estimada para o caso da utilização de um SPAD com ruído de escuro uma ordem de grandeza inferior, bem como valores da QBER total, QBER _{disp} devida aos dispositivos sistêmicos e QBER _{det} devida ao detector, para ambos os casos. | 114 |
| Tabela 8: Visibilidade das duas saídas do sistema com enlace de sincronismo medida e estimada para o caso da utilização de um SPAD com ruído de escuro uma ordem de grandeza inferior, bem como valores da QBER total, QBER _{disp} devida aos dispositivos sistêmicos e QBER _{det} devida ao detector, para ambos os casos. | 120 |

Lista de abreviaturas e siglas

AM – *Amplitude modulation/modulator* – Modulação/modulador de amplitude;
B92 – Protocolo Bennett 1992;
BB84 – Protocolo Bennett-Brassard 1984;
Ch – Chave óptica;
CP – Célula de Pockels;
DEMUX – Demultiplexador;
DS - *Dispersion shifted* – Dispersão deslocada;
DSB – *Dual-sideband* – Bandas laterais duplas;
DUT – *Device under test* – Dispositivo sob teste;
FFP – Filtro de Fabry-Perot;
FPGA – *Field-programmable gate array*;
IMZ – Interferômetro de Mach-Zehnder;
MUX – Multiplexador;
OSA – *Optical spectrum analyser* – Analisador de espectro óptico;
PBS – *Polarization beamsplitter* – Divisor de feixes por polarização;
PDC – *Parametric downconversion* – *Conversão paramétrica descendente*;
PID – Proporcional - integral – derivativo;
PIN – Positivo - intrínseco – negativo;
PNS – *Photon-splitting number*;
PM – *Phase modulation/modulator* – Modulação/modulador de fase;
PMD – *Polarization-mode dispersion* – Dispersão dos modos de polarização;
POVM - *Positive operator valued measurement*
PPLN – *Periodically poled Lithium-Niobate*
QKD – *Quantum key distribution* – Distribuição quântica de chaves;
QPSK – *Quadrature phase-shift keying* – Chaveamento de fases em quadratura;
RSA – Rivest-Shamir-Adleman;
SMD – *Surface-mounted devices* – Dispositivo de montagem em superfície;
SPAD - *Single-photon avalanche photodetector* – *Detector de fótons únicos por avalanche*;
SSB – *Single-sideband* – Banda lateral única;
TLS – Tunable laser source – Fonte laser sintonizável;
WDM – *Wavelength-division multiplexing* – Multiplexação por comprimento de onda.