

Contagem de fótons no infravermelho próximo e médio via conversão de freqüências aplicada a comunicações quânticas

Guilherme Penello Temporão

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.



Guilherme Penello Temporão

**Contagem de fótons no infravermelho
próximo e médio via conversão de frequências
aplicada a comunicações quânticas**

Tese de Doutorado

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

Orientador: Jean Pierre von der Weid

Rio de Janeiro, março de 2007

Guilherme Penello Temporão

**Contagem de fótons no infravermelho próximo e médio via
conversão de frequências para comunicações quânticas**

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

Jean Pierre von der Weid
Orientador
PUC-Rio

Nicolas Gisin
Co-orientador
Université de Genève

Isabel Cristina dos Santos Carvalho
PUC-Rio

Maria Cristina Ribeiro Carvalho
PUC-Rio

Rogério Passy
MLS Wireless

Paulo Henrique Souto Ribeiro
UFRJ

Alexandre de Oliveira Dal Forno
UERJ

José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 5 de março de 2007

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

Guilherme Penello Temporão

Formado em Engenharia Elétrica com Ênfase em Telecomunicações pela PUC-Rio em 2002. Suas atuais áreas de interesse incluem metrologia em componentes ópticos, óptica quântica e teoria da informação quântica.

Ficha Catalográfica

Temporão, Guilherme Penello

Contagem de fótons no infravermelho próximo e médio via conversão de frequências aplicada a comunicações quânticas / Guilherme Penello Temporão ; orientador: Jean Pierre Von der Weid. – 2007.

199 f. : il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Contagem de fótons. 3. Óptica não-linear. 4. Conversão de frequências. 5. Comunicações quânticas. 6. Criptografia quântica. I. Weid, Jean Pierre von der. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para Ana.

Agradecimentos

Aos profs. Jean Pierre von der Weid e Nicolas Gisin, pela sabedoria, orientação e principalmente pela oportunidade que me foi concedida.

Ao prof. Hugo Zbinden, meu 3º orientador, que acompanhou de perto cada passo desta tese, dentro e fora do laboratório, por todas as discussões, idéias e sugestões.

Aos colegas da Universidade de Genebra Sébastien Tanzilli, Damien Stucki, Matthieu Legré, Thomas Ganz e Robert Thew, pelo companheirismo, por toda a ajuda prestada nas montagens experimentais e pela contagiante determinação e vontade de produzir resultados; ao técnico e amigo Claudio Barreiro, pela paciência, prestatividade, simpatia e excelência dos serviços prestados.

À minha mulher Ana, sem a qual essa tese não existiria, por literalmente ter largado tudo para ir viver em outro país, longe da família, do trabalho e da praia.

A meus pais Liliane e José, pela inspiração, exemplo e apoio que me foram (e continuam sendo) dados ao longo da vida; ao restante da minha família e a meus sogros Tania e Antonio que, assim como meus pais, estiveram presentes ao longo de toda a duração dos trabalhos experimentais na Suíça, apesar da distância.

Aos amigos Mario dal Poz, Regina Ungerer, Andreza e André Lupi, Jorge Ferreira e Cristiane Giovannini, entre muitos outros amigos queridos, que estarão para sempre indissociáveis desta tese e de minhas lembranças desses dois anos de vida em Genebra. Um agradecimento especial a Rafael Cordeiro Azevedo, pela amizade verdadeira e pela inestimável herança que deixou a mim.

Aos demais professores e colegas do GAP-Optique (Uni. Genève), do CETUC (PUC-Rio) e a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão desse trabalho.

Resumo

Temporão, Guilherme Penello. **Contagem de fótons no infravermelho próximo e médio via conversão de frequências aplicada a comunicações quânticas**. Rio de Janeiro, 2007. 199p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Dois dispositivos de contagem de fótons únicos, sensíveis a comprimentos de onda no infravermelho próximo e médio, são propostos e experimentalmente investigados. Ambos utilizam uma técnica de dois estágios, composta de uma etapa inicial de conversão de frequências em um cristal não-linear seguida de detecção por um fotodiodo avalanche de silício. Enquanto o primeiro projeto é voltado à detecção de fótons únicos a 1.55 μm para comunicações quânticas via fibra óptica, usando um processo intra-cavidade, o segundo projeto prevê o desenvolvimento de um contador de fótons operando a 4.65 μm para sistemas de espaço livre. Neste caso, um estudo de viabilidade para um sistema prático de criptografia quântica operando em um comprimento de onda no infravermelho médio é realizado. Os resultados mostram que, usando a tecnologia disponível na atualidade, tal sistema pode ser construído, embora sua utilidade se mostre restrita a enlaces possuindo certas condições meteorológicas específicas.

Palavras-chave

Contagem de fótons; Óptica não-linear; Conversão de frequências; Comunicações quânticas; Criptografia quântica; Óptica de espaço livre.

Abstract

Temporão, Guilherme Penello. **Single photon counting in the near- and mid-infrared via frequency up-conversion applied to quantum communications.** Rio de Janeiro, 2007. 199p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Two single photon counting devices, operating at near- and mid-infrared wavelengths, are introduced and experimentally investigated. Both use a two-stage technique, comprised of an initial frequency up-conversion procedure inside a nonlinear crystal followed by a silicon avalanche photodiode. Whereas the first project consists on detection of single photons at 1.55 μm for fiber-optic-based quantum communications, using a cavity-enhanced procedure, the second project envisions the development of a single-photon counter operating at 4.65 μm for free-space systems. In this case, a feasibility study for a practical quantum key distribution system operating in a mid-infrared wavelength is performed. The results show that, using present-day technology, such a system can be constructed, albeit its usefulness would be restricted to operation under very specific weather conditions.

Keywords

Single photon counting; Nonlinear optics; Frequency up-conversion; Quantum communications; Quantum Key Distribution; Free-Space Optics.

Sumário

| | |
|--|----|
| 1 . Introdução | 15 |
| 2 . Comunicações Quânticas | 18 |
| 2.1. Qubits | 19 |
| 2.1.1. Representação de qubits | 20 |
| 2.1.2. Múltiplos qubits | 23 |
| 2.1.3. Emaranhamento | 24 |
| 2.1.4. Estados mistos e a matriz de densidade | 25 |
| 2.1.5. Implementações práticas | 29 |
| 2.2. Geração de fótons únicos | 33 |
| 2.2.1. Lasers atenuados | 34 |
| 2.2.2. Fonte de fótons anunciados | 36 |
| 2.3. O canal quântico | 37 |
| 2.4. Detecção de fótons únicos | 40 |
| 2.4.1. Caracterização de um contador de fótons | 41 |
| 2.4.2. A dependência do comprimento de onda | 46 |
| 2.5. Criptografia quântica | 48 |
| 2.5.1. O problema da distribuição de chaves | 49 |
| 2.5.2. Codificação em bases não-ortogonais | 51 |
| 2.5.3. O protocolo BB84 | 54 |
| 2.5.4. Implementação prática | 58 |
| 3 . Meios não-lineares e conversão de frequências | 67 |
| 3.1. Efeitos não-lineares de segunda ordem | 70 |
| 3.2. Propriedades da susceptibilidade não-linear | 72 |
| 3.2.1. Simetrias Espaciais | 74 |
| 3.2.2. Coeficiente não-linear efetivo (d_{eff}) | 76 |
| 3.3. A equação de onda para meios não-lineares | 77 |
| 3.3.1. As equações de onda acopladas para SFG | 79 |
| 3.3.2. As Relações de Manley-Rowe | 81 |

| | |
|--|---------|
| 3.3.3. Uma primeira expressão para a onda gerada | 82 |
| 3.3.4. O efeito de depleção do sinal de entrada | 85 |
| 3.4. Casamento de fase | 89 |
| 3.4.1. Casamento de fase via birrefringência | 91 |
| 3.4.2. Quasi-Casamento de Fase | 96 |
| 3.5. A Teoria de Boyd-Kleinman para Feixes Gaussianos | 99 |
| 3.5.1. Análise para SHG | 100 |
| 3.5.2. Análise para SFG | 106 |
| 3.6. Geração de Soma de Frequências de um ponto de vista quântico | 108 |
| 3.6.1. Considerações fundamentais | 108 |
| 3.6.2. Eficiência quântica de conversão | 110 |
| 3.6.3. Descrição quântica do processo de SFG | 112 |
| 4 . Contagem de Fótons a 1.55 μm via SFG Intra-Cavidade | 114 |
| 4.1. Primeira tentativa: cavidade linear simétrica | 115 |
| 4.1.1. Análise de estabilidade e eficiência de conversão | 117 |
| 4.1.2. O problema da focalização | 120 |
| 4.1.3. Montagem experimental | 124 |
| 4.2. A cavidade em “L” | 132 |
| 4.2.1. Considerações geométricas e critério de estabilidade | 133 |
| 4.2.2. Resultados Experimentais | 136 |
| 4.3. Discussão dos resultados | 140 |
| 5 . Contagem de fótons a 4.65 μm para criptografia quântica via canal atmosférico | 144 |
| 5.1. Seleção do comprimento de onda | 146 |
| 5.1.1. Limites impostos pelo processo de detecção | 147 |
| 5.1.2. Ruído térmico | 148 |
| 5.1.3. Condições atmosféricas e o espalhamento Mie | 152 |
| 5.2. Resultados experimentais | 155 |
| 5.2.1. Obtenção do sinal de soma de frequências | 155 |
| 5.2.2. Medidas de eficiência e ruído no regime de contagem de fótons | 160 |
| 5.2.3. Desempenho do detector | 164 |

| | |
|---|-----|
| 5.2.4. Montagem experimental para avaliação da QBER | 166 |
| 5.3. Estudo de viabilidade para criptografia quântica | 171 |
| 5.3.1. Construindo Alice e Bob | 171 |
| 5.3.2. Desempenho e limites no canal atmosférico | 176 |
| 5.3.3. O efeito da luz solar: uma discussão qualitativa | 180 |
| 6 . Conclusão | 183 |
| 7 . Referências bibliográficas | 186 |
| Apêndice A O que é um Espaço de Hilbert? | 191 |
| Apêndice B Feixes Gaussianos | 196 |

Lista de figuras

| | |
|--|-----|
| Figura 1: Representação de qubits como pontos na superfície de uma esfera. | 22 |
| Figura 2. Preparação e medida de qubits codificados em polarização | 31 |
| Figura 3. Preparação e medida de qubits codificados em time-bins | 32 |
| Figura 4. Esquema simplificado para fonte de fótons “anunciados” | 36 |
| Figura 5. Evolução de sistemas quânticos isolados e abertos | 38 |
| Figura 6. Sistema de criptografia quântica, no qual Alice e Bob estão interligados por um canal quântico e um canal clássico. | 55 |
| Figura 7. (a) Distribuição de cargas em átomo neutro; (b) A nuvem eletrônica se desloca com a aplicação de um campo elétrico externo. | 67 |
| Figura 8. Efeitos não-lineares de segunda ordem. (a) SHG; (b) Retificação óptica; (c) SFG; (d) DFG | 71 |
| Figura 9. Função $\text{sinc}^2(x) = \text{sen}^2(x)/x^2$ | 84 |
| Figura 10. Variação da intensidade da onda de soma de frequências e do sinal de entrada em função do comprimento do cristal não-linear | 88 |
| Figura 11. O conceito de casamento de fase | 89 |
| Figura 12. Casamento de fase birrefringente | 91 |
| Figura 13. (a) Interação do tipo I, na qual os sinais de entrada possuem a mesma polarização. (b) Interação do tipo II, na qual os sinais de entrada possuem estados de polarização ortogonais. | 92 |
| Figura 14. Casamento de fase por ângulo | 94 |
| Figura 15. (a) Fasores em fase ($\Delta k = 0$); (b) Soma de fasores com $\Delta k \neq 0$ para $x = l_c$; (c) Idem para $x = 2l_c$ | 97 |
| Figura 16. Quasi-casamento de fase | 98 |
| Figura 17. Focalização forte e fraca de feixes gaussianos | 99 |
| Figura 18. Análise de Boyd-Kleinman para feixes gaussianos. | 101 |
| Figura 19. Fator de focalização de Boyd-Kleinman em função do grau de focalização para diferentes valores de B. | 105 |
| Figura 20. Os valores de ξ_{1m} e ξ_{2m} para diferentes valores de k, em função de B. | 107 |

| | |
|--|-----|
| Figura 21. Valor máximo do fator de focalização em função de k e B | 107 |
| Figura 22. Diagrama de energia para o processo de SFG | 109 |
| Figura 23. Cavityde ressonante utilizando dois espelhos esféricos Próximo do espelho da direita é posicionado o cristal laser (LC), e próximo ao centro da cavityde encontra-se o cristal não-linear (NC) | 116 |
| Figura 24. Dependência do tamanho efetivo ideal da cavityde com o fator de focalização | 119 |
| Figura 25. Desenho mostrando as distâncias envolvidas no cálculo da posição e distância focal da lente | 121 |
| Figura 26. Distância focal mínima (normalizada pelo raio de curvatura do espelho) em função do comprimento efetivo normalizado. | 123 |
| Figura 27. Montagem experimental usando cavityde linear | 125 |
| Figura 28. Imagem do feixe a 1064 nm na saída da cavityde | 126 |
| Figura 29. Diminuição da potência do laser YVO_4 com o aumento do comprimento da cavityde | 127 |
| Figura 30. Potência do sinal convertido em função da potência de bombeio | 129 |
| Figura 31. Taxa de ruído em função da potência intra-cavityde a 1064 nm. | 132 |
| Figura 32. Cavityde em “L” | 133 |
| Figura 33. Comportamento da posição da cintura e da distância de Rayleigh em função do comprimento da cavityde em “L” | 135 |
| Figura 34. Comportamento linear da potência intra-cavityde em função do bombeio para a configuração em “L” | 137 |
| Figura 35. Eficiência de conversão em função da potência intra-cavityde para a configuração em “L” | 138 |
| Figura 36. Ruído obtido na cavityde em “L” | 139 |
| Figura 37. Primeiros resultados obtidos pelo grupo de pesquisadores Haifeng Pan <i>et al</i> | 141 |
| Figura 38. Resultados recentes do grupo de Haifeng Pan <i>et al</i> | 142 |
| Figura 39. Curva típica de transmissão atmosférica sob condições climáticas limpas | 145 |

| | |
|---|-----|
| Figura 40. Linha sólida: probabilidade de ruído de fundo por pulso, em função do comprimento de onda. Linha tracejada: radiação solar normalizada, expressa em fótons por unidade de tempo por unidade de área por unidade de ângulo sólido. | 151 |
| Figura 41. Dados experimentais de atenuação atmosférica para um enlace de visibilidade variável sob efeito de névoa “coastal upslope” | 154 |
| Figura 42. Montagem experimental para medida clássica de eficiência de conversão. | 155 |
| Figura 43. Espectro do sinal convertido usando AGS e PPLN | 158 |
| Figura 44. Variação do sinal de soma de frequências com a temperatura do cristal PPLN | 159 |
| Figura 45. Transmissão da luz através de 1 cm de cristal de niobato de lítio, em função do comprimento de onda | 162 |
| Figura 46. Variação teórica da sensibilidade com a eficiência global de detecção para a detecção via conversão de frequências. | 166 |
| Figura 47. Montagem experimental para avaliação da QBER | 167 |
| Figura 48. Rotação de polarização usando dois polarizadores | 168 |
| Figura 49. Histograma do tempo de chegada dos fótons com relação ao tempo de emissão dos pulsos elétricos no QCL após vários segundos | 169 |
| Figura 50. Curva de visibilidade para detecção de fótons únicos a $4.65 \mu\text{m}$ na base horizontal-vertical para $\mu = 0.8$. | 170 |
| Figura 51. Implementação prática do sistema de transmissão (Alice) | 171 |
| Figura 52. Implementação prática do sistema de recepção (Bob): primeira opção | 172 |
| Figura 53. Configuração alternativa para o sistema de Bob | 174 |
| Figura 54. Modelagem dos efeitos da radiação solar sobre um sistema de comunicações quânticas de espaço livre. | 180 |
| Figura 55. Função de fase de Mie para névoa de radiação com raio médio de $1 \mu\text{m}$ para os comprimentos de onda relevantes | 181 |

Alice laughed: "There's no use trying," she said; "one can't believe impossible things."

"I daresay you haven't had much practice," said the Queen. "When I was younger, I always did it for half an hour a day. Why, sometimes I've believed as many as six impossible things before breakfast."

- Lewis Carroll, "Through the Looking Glass"