

**Título em Português:** Projeto e construção de um amplificador paramétrico óptico operando no infravermelho médio

**Título em Inglês:** Project and implementation of an optical parametric amplifier operating in the mid-infrared

**Autor:** Gabriel de Melo Borges

**Instituição:** Universidade de São Paulo

**Unidade:** Instituto de Física de São Carlos

**Orientador:** Paulo Barbeitas Miranda

**Área de Pesquisa /** Áreas Clássicas de Fenomenologia e suas Aplicações  
**SubÁrea:**

**Agência Financiadora:** USP - Programa Unificado de Bolsas

## Projeto e construção de amplificador paramétrico óptico operando no infravermelho médio

**Gabriel de Melo Borges**

**Prof. Dr. Paulo Barbeitas Miranda**

Instituto de Física de São Carlos - USP

gabsmb@usp.br

### Objetivos

Um OPA (amplificador paramétrico óptico) é um dispositivo utilizado em espectroscopia para amplificar uma luz coerente e sintonizável obtida a partir de processos de conversão de frequências<sup>1</sup>. O objetivo final do OPA é utilizá-lo em espectroscopia vibracional e eletrônica de interfaces, baseado no processo não linear SFG (geração de soma de frequências)<sup>2</sup>. Para tal, o projeto foca na etapa de geração de luz supercontínua (SC) como pulso semente, a fim de posteriormente produzir pulsos sintonizáveis no infravermelho médio a partir de um laser de 30 ps operando em 1064 nm, baseado em um projeto anterior<sup>3</sup>.

### Métodos e Procedimentos

A amplificação paramétrica, assim como DFG (geração de diferença de frequência) e OPG (geração paramétrica óptica), são processos de mistura de três ondas que ocorrem em meios não centros simétricos que apresentam não linearidade  $\chi^{(2)}$ . Nestes processos, existe a conversão de energia de um feixe de bombeio (*pump*) de frequência  $\omega_1$  para um feixe sinal (*signal*) de frequência  $\omega_2$  e um feixe (*idler*) de frequência complementar  $\omega_3$ .<sup>2</sup>

$$\omega_3 = \omega_1 - \omega_2 \quad (1)$$

No OPA em questão, o pulso de bombeio opera em  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  e o *idler* de interesse encontra-se entre  $2,6 \mu\text{m}$  e  $10 \mu\text{m}$ . Portanto, a geração de supercontínuo estável, que será o sinal  $\omega_2$  injetado no estágio de amplificação, deverá compreender a região entre  $1,2 \mu\text{m}$  e  $1,8 \mu\text{m}$  no infravermelho próximo com alta largura espectral. Logo, foram testados diversos materiais descritos na literatura para produzir supercontínuo de luz branca. Os testes de geração de contínuo foram realizados para  $D_2O$  (água deuterada) e  $CS_2$  (dissulfeto de carbono) líquidos, vidro BK7 e fibra de cristal fotônico (FCF) de alta não linearidade<sup>4</sup>. As Figuras 1 e 2 mostram as condições em que foram realizados os testes para o BK7 e FCF respectivamente.

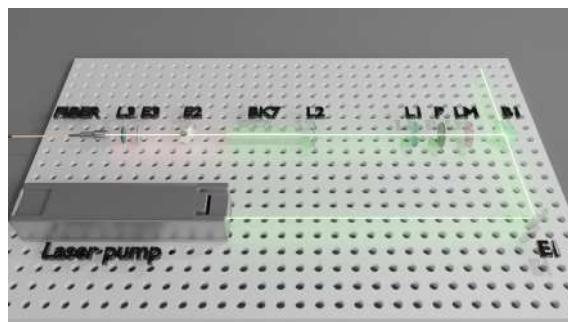


Figura 1: Aparato para geração de contínuo em um cilindro de vidro BK7 a partir de um bombeio em 1064 nm com largura temporal de 30 ps.

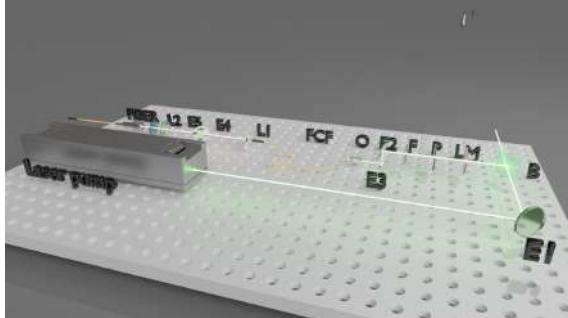


Figura 2: Aparato para geração de contínuo em fibra de cristal fotônico de alta não linearidade a partir de um bombeio em 1064 nm com largura temporal de 30 ps.

## Resultados

Os testes realizados com os líquidos inseridos em uma cubeta especialmente projetada para geração de SC, com 10 cm de comprimento óptico, mostraram que em  $D_2O$ , a absorbância significativa a partir de 1300 nm compromete a faixa de interesse. Já em  $CS_2$ , o líquido degradava-se com facilidade antes que a luz supercontínua fosse gerada.

No bastão de vidro BK7, o limiar de dano foi encontrado em 2,85 mJ e o limiar de geração em 1,22 mJ. De maneira arbitrária, tomou-se o espectro gerado em oito momentos distintos, que estão mostrados na Fig.3, de modo a demonstrar a instabilidade do supercontínuo. A flutuação está ligada ao processo de auto focalização da luz, a qual é interrompida em baixas intensidades devido ao *defocusing* de elétrons livres, o que impede a formação de ondas de choque óptico no final do pulso, passo que é importante para a geração de supercontínuo em vidro.<sup>4</sup> Na PCF (ThorLabs, modelo SC-5.0-1040) a energia de limiar de geração de SC foi encontrada em  $E_{LS} = 0,850 \mu J$  e o limiar de dano em  $E_{LD} = 1,25 \mu J$ . Com o auxílio de um fotodiodo, foi possível observar uma instabilidade de 10% na intensidade do supercontínuo. Na Fig. 4 temos o espectro do SC gerado na PCF.

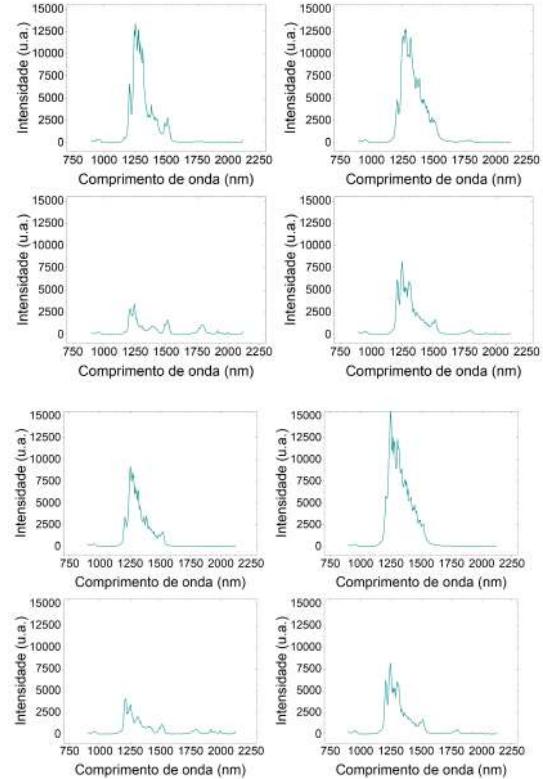


Figura 3: Espectro do SC gerado em um bastão de BK7, energia de entrada  $E_1 = 2,4 \text{ mJ}$  e saída  $E_2$  flutuando entre 0,1 e 0,18 mJ. Tempo de aquisição de cada espectro igual a 100 ms.

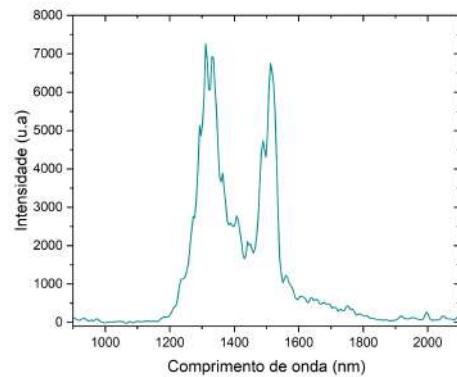


Figura 4: Espectro do SC gerado em uma fibra Nonlinear Photonic Fiber - SC-5.0-1040 de 2 metros. Energia de bombeio em 0,92  $\mu J$  em 1064 nm e largura temporal de 30 ps.

## Conclusões

Os testes iniciais de geração de supercontínuo com bombeio por pulsos de 30 ps em 1064 nm em líquidos não foram bem sucedidos. Na água deuterada o espectro gerado era muito instável e não cobria a faixa espectral de interesse. Já no dissulfeto de carbono, o líquido se degradava antes de gerar supercontínuo. No vidro BK7, um espectro um pouco mais largo que na água deuterada foi obtido, e com boa intensidade e perfil espacial, mas com grande flutuação de intensidade e espectro. Além da flutuação, o espectro não apresentava intensidade significativa na faixa de 1600 a 1800 nm, necessária para a faixa espectral de interesse para a saída do OPA. Finalmente, para a FCF, o espectro obtido apresenta alta estabilidade e abrange grande parte do infravermelho próximo necessário, estendendo-se até 1800 nm.

## Agradecimentos

Agradeço ao apoio dos colegas do grupo de polímeros Bernhard Gross (IFSC-USP) que me ajudaram durante o projeto, Bruna Borges, Marcos da Silva e Anderson Emanuel. Além disso, agradeço ao grupo de fotônica pelo empréstimo de materiais e à Universidade de São Paulo pelos recursos fornecidos.

## Referências

- [1] P. B. Miranda and Y. R. Shen. Liquid interfaces: A study by sum-frequency vibrational spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry B*, 103(17):3292–3307, 1999.
- [2] R.W. Boyd and D. Prato. *Nonlinear Optics*. Elsevier Science, 2008.
- [3] Marcela de Freitas Mendonça. Projeto e construção de um amplificador paramétrico óptico operando no infravermelho médio. Dissertação de mestrado em física aplicada, Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2010.
- [4] John M. Dudley, Goëry Genty, and Stéphane Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber. *Rev. Mod. Phys.*, 78:1135–1184, Oct 2006.

## Design and construction of an optical parametric amplifier operating in the mid-infrared

**Gabriel de Melo Borges**

**Prof. Dr. Paulo Barbeitas Miranda**

Instituto de Física de São Carlos - USP

gabsmb@usp.br

### Objectives

An OPA (optical parametric amplifier) is an apparatus used in spectroscopy to amplify coherent and tunable light generated by a frequency conversion process<sup>1</sup>. The aim of this study is the use of this OPA in electronic and vibrational interface spectroscopy involving the nonlinear process SFG (sum frequency generation)<sup>2</sup>. Therefore, this project focuses on the supercontinuum (SC) generation stage, which will be used as a signal seed pulse, for producing afterwards tunable pulses in the mid-infrared from a 30 ps pump laser at 1064 nm, as in a previous project<sup>3</sup>.

### Materials and methods

The parametric amplification, as DFG (difference frequency generation) and OPG (optical parametric generation), are three wave mixing processes in non centrosymmetric media with  $\chi^{(2)}$  non linearity. In these processes, the energy from the pump (frequency  $\omega_1$ ) is converted to a signal (frequency  $\omega_2$ ) and an idler of complementary frequency  $\omega_3$ .<sup>2</sup>

$$\omega_3 = \omega_1 - \omega_2 \quad (1)$$

In this proposed OPA, the pump beam is at  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  and the idler's range is between  $2,6 \mu\text{m}$  e  $10 \mu\text{m}$ . Hence, the supercontinuum generation, which will be the signal  $\omega_2$  injected

in the amplification stage, must cover the near infrared between  $1,2 \mu\text{m}$  and  $1,8 \mu\text{m}$  with high stability and smooth spectrum. For this reason, various materials described in literature to produce white light supercontinuum were tested. The tests of continuum generation were performed in liquids such as  $D_2O$  (deuterated water) and  $CS_2$  (carbon disulfide), BK7 glass, and photonic optical fiber (PCF) of high nonlinearity. The Figures 1 e 2 show the scheme of optical setups for the tests with BK7 and PCF, respectively.

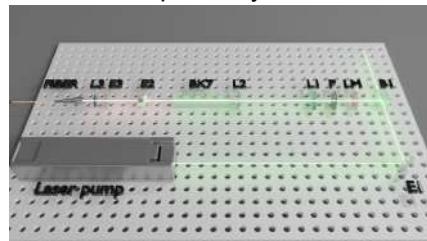


Figure 1: Optical setup for continuum generation in a BK7 glass cylinder from a 30 ps pump laser at 1064 nm.

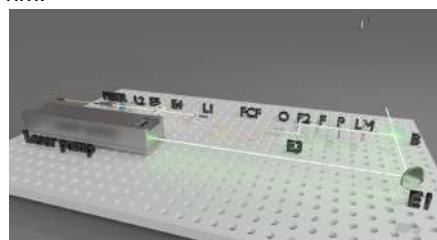


Figure 2: Optical setup for continuum generation in photonic crystal fiber of high non linearity from a pump at 1064 nm and 30 ps.

## Results

The tests performed in liquids inside a cuvette designed for SC generation, with 10 cm of optical length, revealed that in  $D_2O$ , the significant absorbance beyond 1300 nm compromises the spectral range of interest. Alternatively, in  $CS_2$ , the liquid degraded itself easily before supercontinuum generation. In the BK7 rod, the damage threshold was measured at 2,85 mJ and the generation threshold at 1,22 mJ. Arbitrarily, the generated spectrum was recorded at eight different moments, shown at Fig.3, as an example of the instability of the SC.

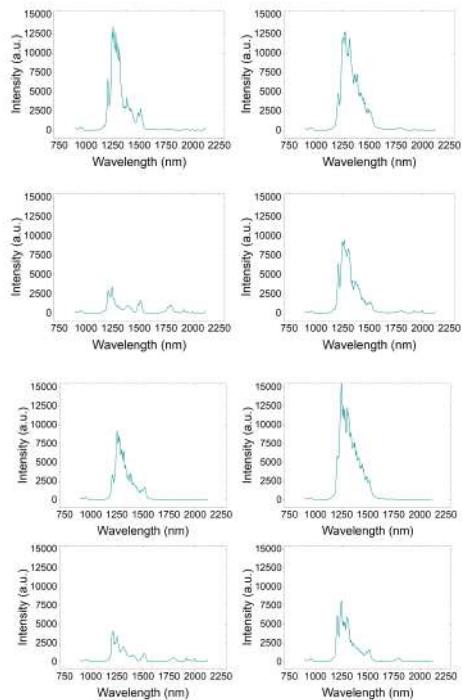


Figure 3: SC spectra in a BK7 rod, input energy  $E_1 = 2,4 \mu J$  and output energy  $E_2$  fluctuating between 0,1 and 0,18 mJ. Acquisition time of 100 ms for each spectrum.

The fluctuation is due to the self-focusing process of light, which is interrupted at low intensities due to defocusing of free electrons, preventing the formation of shock waves at the end of the pulse, which are important for supercontinuum generation in glass.<sup>4</sup> In the

PCF (ThorLabs, model SC-5.0-1040), the SC generation threshold was measured at  $E_{LS} = 0,850 \mu J$  and the damage threshold at  $E_{LD} = 1,25 \mu J$ . With a photodiode, an instability of 10% for the SC intensity was measured. Fig. 4 shows the SC spectrum generated in the PCF.

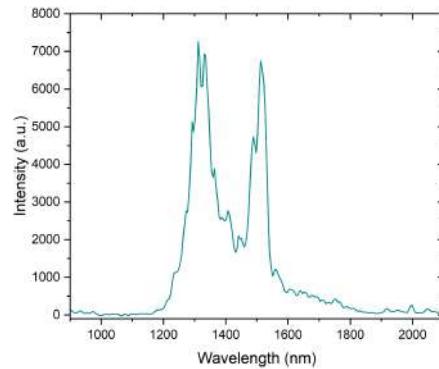


Figura 4: SC spectrum generated in a photonic crystal fiber (ThorLabs, model SC-5.0-1040) of 2m length. Input energy equal to 0,92  $\mu J$  at 1064 nm and pulses of 30 ps.

## Conclusions

The initial tests of supercontinuum generation with a pump of 30 ps at 1064 nm in liquids were not successful. In heavy water, the spectrum was very unstable and did not cover the required spectral range. In carbon disulfide, the liquid is degraded before any generation of continuum light. In BK7 glass, we obtained a spectrum a little broader than in heavy water, with good intensity and spatial profile, but with large intensity and spectral fluctuations. Besides the instability, the spectrum did not present significant intensity between 1600 and 1800 nm, required for the spectral range at the OPA's output. Finally, in the PFC, the spectrum presents high stability and covers the broad range required for the near infrared seed, extending until 1800 nm.

## Acknowledgments

We thank the support from our colleagues at the Bernhard Gross Polymer Group (IFSC-USP), Bruna Borges, Marcos da Silva

and Anderson Emanuel. Also, we thank the photonic group of IFSC for the support by lending equipment and materials, and the Universidade de São Paulo for funding the project.

## References

- [1] P. B. Miranda and Y. R. Shen. Liquid interfaces: A study by sum-frequency vibrational spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry B*, 103(17):3292–3307, 1999.
- [2] R.W. Boyd and D. Prato. *Nonlinear Optics*. Elsevier Science, 2008.
- [3] Marcela de Freitas Mendonça. Projeto e construção de um amplificador paramétrico óptico operando no infravermelho médio. *Dissertação de mestrado em física aplicada*, Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2010.
- [4] John M. Dudley, Goëry Genty, and Stéphane Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber. *Rev. Mod. Phys.*, 78:1135–1184, Oct 2006.