

**Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP**

**Instituto de Física “Gleb Wataghin” – IFGW**

**Relatório Final de Iniciação Científica I**

**F590**

**Radiação Laser no Visível e Ultravioleta através de  
Geração de Segundo Harmônico**



**Orientanda: Bruna Regina Alves Hota**

**Orientador: Prof.Dr.Flávio Caldas da Cruz**

**Coordenador: Prof. Dr José Joaquim Lunazzi**

## **1 Resumo**

O projeto previa trabalhar em uma montagem para gerar radiação laser no ultravioleta (266 nm) através de geração de segundo harmônico de um laser verde (532 nm).

Nestes primeiros meses de iniciação científica estudei o processo de geração de segundo harmônico. Neste relatório serão apresentados os detalhes sobre a geração de segundo harmônico, bem como os primeiros resultados da geração da radiação laser no ultravioleta.

## **2 Introdução**

Antes do advento dos lasers a polarização gerada em materiais dependia linearmente da intensidade do campo elétrico da radiação incidente neste material. Com os lasers, que tem uma potência muito mais alta que a radiação comum, percebeu-se que essa dependência poderia ser não linear. Os cientistas se aproveitaram desse fato para criar novas cores de luz a partir de uma já existente. Por exemplo, a resposta não linear da polarização de um cristal à intensidade do campo elétrico da radiação incidente pode ser usada para gerar uma luz com o dobro da frequência da luz incidente (segundo harmônico).

Neste experimento iremos gerar segundo harmônico, primeiramente em 532 nm, através de um laser Q - switched em 1064nm, apesar de não ser o objetivo principal deste projeto, tal procedimento visa facilitar o estudo e o entendimento da técnica de duplicação em frequência que será utilizada para gerar ultravioleta (266nm) a partir de um laser contínuo em 532 nm.

## **3 Objetivos e Metas do Projeto**

Um dos objetivos deste trabalho é gerar segundo harmônico a partir de laser Q- Switched em 1064 nm, Um cristal de KTP será utilizado para a gerar radiação em 532nm. O outro objetivo é montagem e otimização do sistema de geração de segundo harmônico para laser de 532 nm. Um cristal de BBO será usado para gerar radiação em 266 nm, a partir de um laser single-frequency comercial de 10 W. Este laser terá sua potência amplificada em uma cavidade óptica ressonante, com objetivo de maximizar a eficiência de conversão.

## 4 Resultados atingidos

Neste semestre focamos o estudo sobre geração de segundo harmônico, cumprindo deste modo, uma boa parte do projeto.

### 4.1 Geração de Segundo Harmônico

#### 1. Introdução

Novas frequências de lasers podem ser geradas a partir de óptica não-linear. Uma das técnicas utilizadas é conhecida como geração de segundo harmônico (second harmonic generation, SHG) e utilizam cristais não lineares apropriados para cada comprimento de onda.

Historicamente, a primeira vez que se observou a geração de segundo harmônico foi em 1961 por Franken et al.[1]. Tais medidas foram realizadas com um laser de rubi pulsado e um cristal de quartzo obtendo um feixe com o dobro da frequência incidente, contudo a eficiência do processo foi extremamente baixa. Desde então a técnica vem sendo estudada e também novos materiais não lineares vem sendo desenvolvidos, o que torna esta técnica muito importante para construções de laser em novas frequências.

#### 2. Fundamentos

Em um cristal sem perdas e com susceptibilidade não linear, um campo elétrico aplicado  $\mathbf{E}$  produz uma polarização dielétrica  $\mathbf{P}$  que pode ser expandida em termos de potências desse campo elétrico aplicado [2]

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 [\chi^{(1)}\mathbf{E} + \chi^{(2)}\mathbf{E}^2 + \chi^{(3)}\mathbf{E}^3 + \dots] \quad (4.1)$$

Onde  $\epsilon_0$  é a permissividade no vácuo e  $\chi^{(1)}$  é a susceptibilidade linear responsável pela polarização linear do material. Os demais  $\chi^{(k)}$  são as susceptibilidades ópticas não lineares de ordem  $k$ .

Seja uma onda eletromagnética com duas componentes, incidentes num cristal não linear,

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 \cos(\omega_1 t - \mathbf{K}_1 z) + \mathbf{E}_2 \cos(\omega_2 t - \mathbf{K}_2 z) \quad (4.2)$$

Num ponto qualquer do cristal, por exemplo em  $z=0$ , a polarização induzida é gerada pela combinação das duas componentes do campo

elétrico  $E_1$  e  $E_2$ . Substituindo a eq. (4.2) na (4.1) obtém-se o termo quadrático:

$$E^2(z=0) = E_1^2 \cos^2 \omega_1 t + E_2^2 \cos^2 \omega_2 t + 2 E_1 E_2 \cos \omega_1 t \cos \omega_2 t$$

$$E^2(z=0) = \frac{1}{2}(E_1^2 + E_2^2) + \frac{1}{2}(E_1^2 \cos 2\omega_1 t + E_2^2 \cos 2\omega_2 t) + E_1 E_2 [\cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t], \quad (4.3)$$

que é composta por um termo em  $\omega=0$  ( $E_1^2 + E_2^2$ ) que gera uma voltagem “DC”(efeito retificador) no meio não linear, termos oscilantes com frequência  $2\omega_1$  e  $2\omega_2$  (geração de segundo harmônico) e termos de soma e subtração de frequências,  $\omega_1 \pm \omega_2$ . [3].

#### 4.2 Geração de Segundo Harmônico com o laser pulsado em 1064nm

Mediu-se a frequência e o período dos pulsos do laser Q – switched de Nd-Yag em 1064 nm com o auxílio de fotodetector e de um osciloscópio. A imagem obtida pelo osciloscópio está na figura 4.1, a frequência obtida foi de  $(6,86 \pm 0,01)$ KHz e com o auxílio dos cursores o período obtido foi de 146  $\mu$ s.

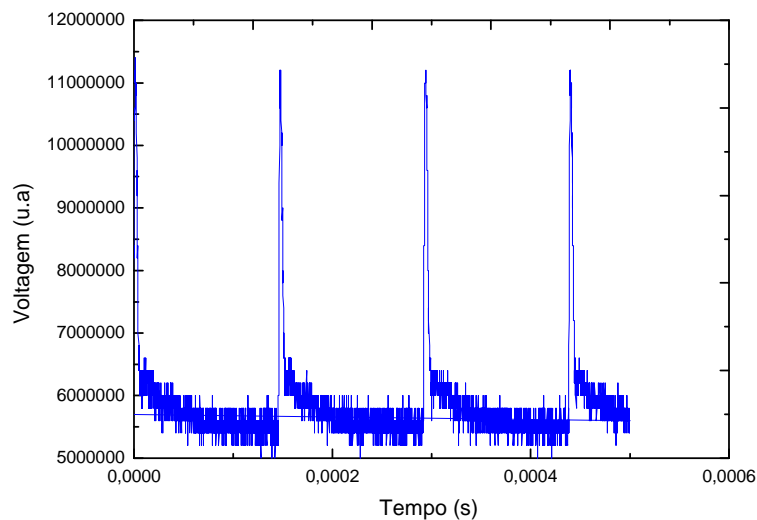


Fig 4.1 Dados obtidos no osciloscópio para obter-se a taxa de repetição do laser.

O primeiro experimento realizado consistiu em usar um laser Q - switched no infravermelho (1064 nm), o feixe passou uma única vez pelo cristal de KTP (potássio titânio fosfato) e então analisamos a geração de 532 nm (fig 4.2). A curva de eficiência obtida no processo de duplicação de frequência está nas figuras 4.3 e 4.4. Variamos a intensidade do laser com o auxílio de um polarizador.

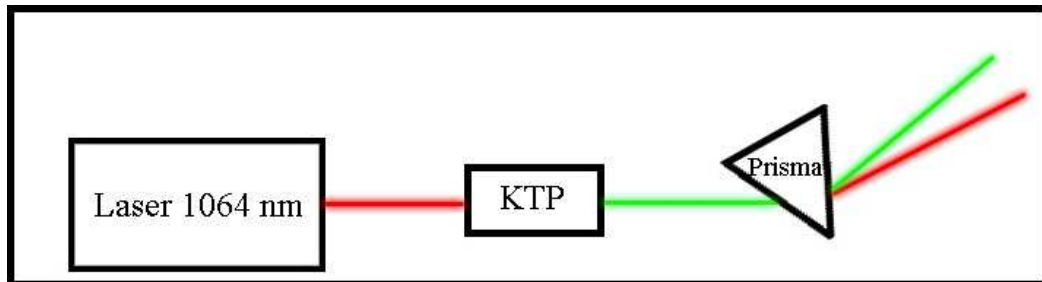


Fig 4.2 Esquema experimental para geração de 532 nm a partir de um laser Q-switched em 1064 nm.

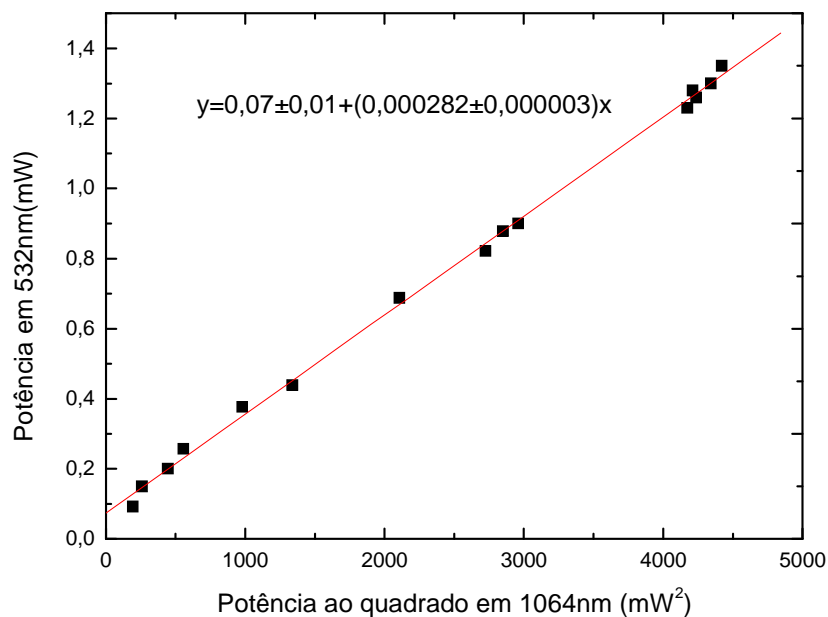


Fig 4.3 Eficiência na geração de segundo harmônico (GHS) de um laser Q-switched em 1064nm.

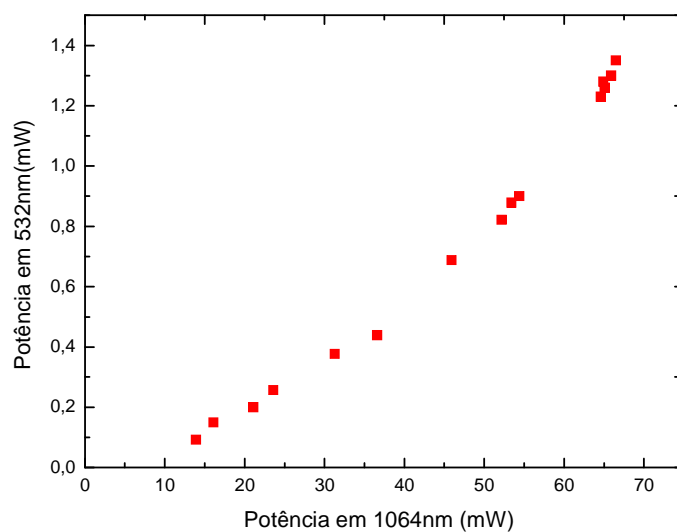


Fig 4.4 Gráfico da potência incidente e da potência de luz verde gerada.

A análise do espectro de emissão do cristal no verde foi feita usando o espectrômetro portátil Ocean Optics modelo USB4000 acoplado por uma fibra óptica. A figura 4.4, mostra o pico observado no comprimento de onda 532 nm.

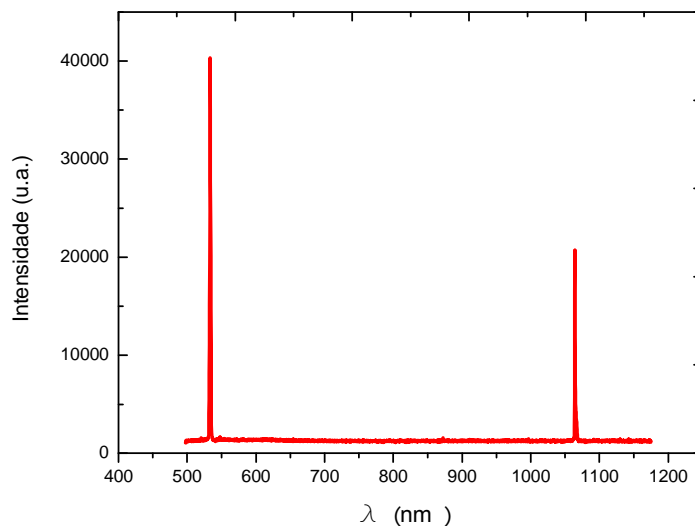


Fig 4.5 Espectro do laser verde gerado pela duplicação de frequência do infravermelho.

Uma observação importante é que apesar do gráfico registrar que a intensidade em 532 nm é superior a intensidade em 1064 nm, esta informação não é verídica e pode ter sido causada pela dificuldade de colocação da fibra óptica e que neste ponto analisou uma maior intensidade em 532 nm.

Analogamente, fizemos o experimento colocando o cristal no meio de lentes ( $L_1$  e  $L_2$ ) de distância focal curta (fig. 4.5). Neste caso, como o esperado, a eficiência de conversão aumentou consideravelmente (fig 4.6 e 4.7).

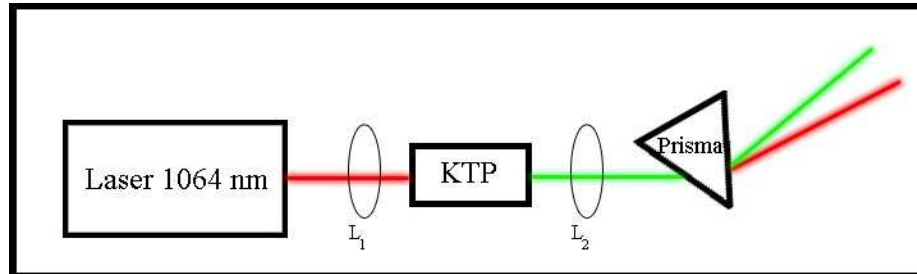


Fig 4.6 Esquema experimental para geração de 532nm com o laser Q-switched em 1064nm otimizado.

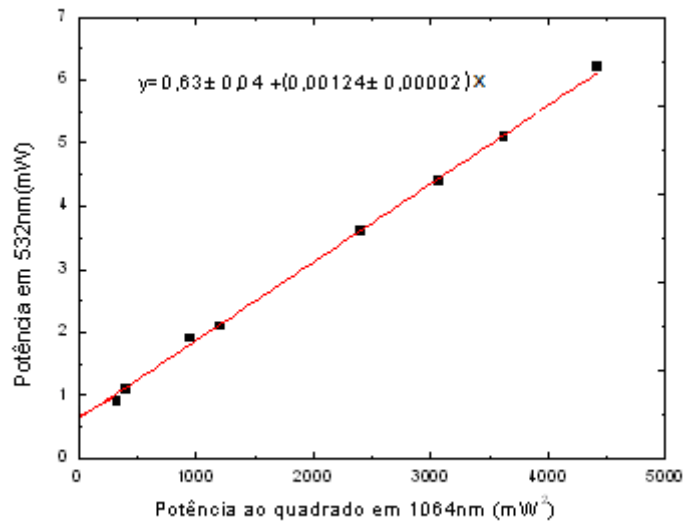


Fig 4.7 Eficiência na geração de segundo harmônico (GHS) de um laser Q-switched em 1064nm na situação em que o feixe é focalizado no cristal.

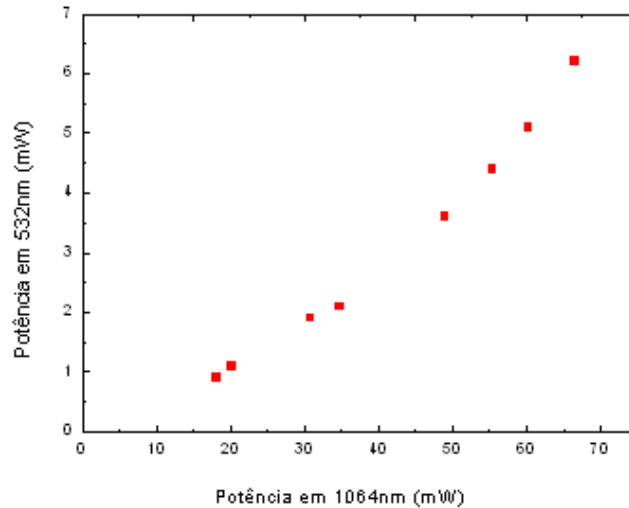


Fig 4.8 Gráfico da potência incidente e da potência de luz verde gerada na situação em que o feixe é focalizado no cristal.

Refizemos o experimento agora substituindo o cristal de KTP da figura 4.6 por um de PPLN (*Periodically Poled Lithium Niobate*) na temperatura de 140,3° C e nesse caso a eficiência de conversão de segundo harmônico foi ainda maior (figura 4.9 e 4.9).

o interessante desse cristal é que a eficiência de conversão de segundo harmônico depende de sua temperatura e também do ângulo com que o feixe inside em sua face. Para analisar o comportamento da temperatura do cristal com relação a eficiência de geração de segundo harmônico foi feito um esquema análogo ao da figura 4.2, substituindo apenas o cristal de KTP pelo de PPLN, o grafico da potência em 532nm versus a temperatura do cristal pode ser vista na figura 4.11.

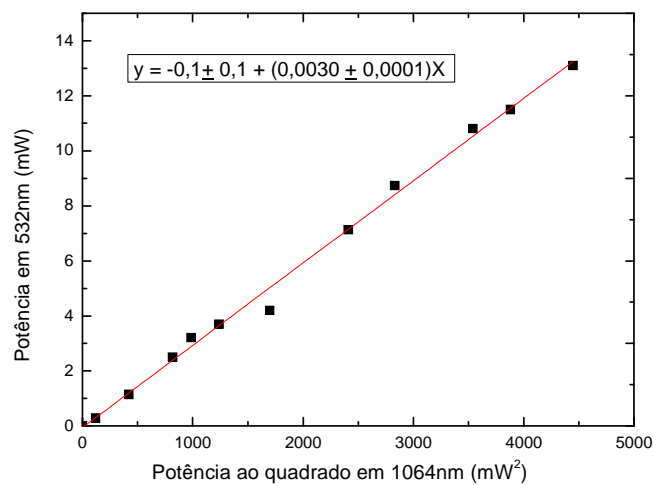


Fig 4.10 Eficiência na geração de segundo harmônico (GHS) de um laser Q-switched em 1064nm na situação em que o feixe é focalizado no cristal de PPLN.



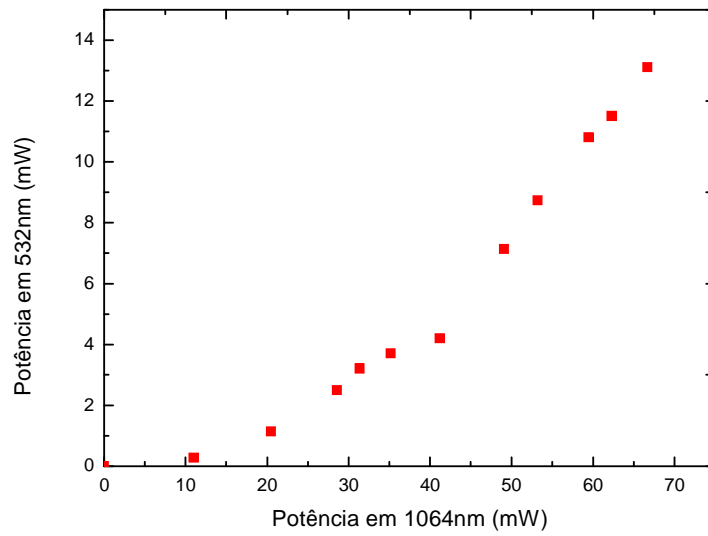


Fig 4.10 Gráfico da potência incidente e da potência de luz verde gerada na situação em que o feixe é focalizado no cristal de PPLN.

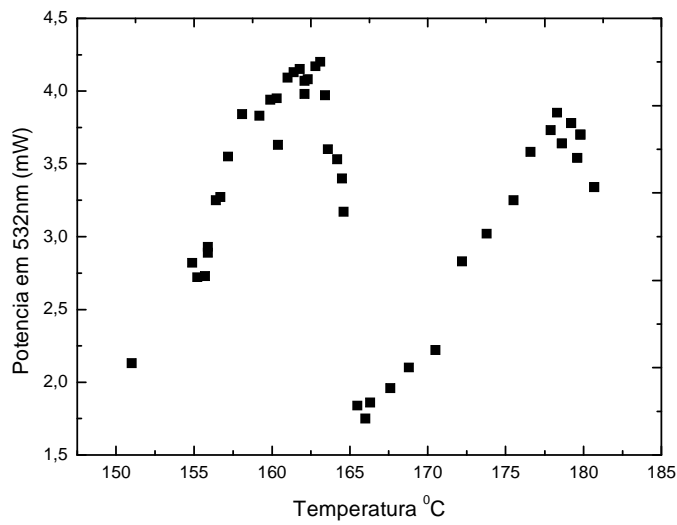


Fig 4.11 Gráfico da potência em 532 nm vs temperatura do cristal PPLN no intervalo de 150°C a 180°C.

### 4.3 Cavity Duplicadora de Frequência

#### 1. Introdução

Utilizando a técnica de geração do segundo harmônico, podemos obter lasers na região ultravioleta, por exemplo, a partir de um laser em 532

nm. Como já explicado, esta técnica baseia-se no uso de cristais não-lineares capazes de emitir um fóton a cada dois fótons incidentes com metade do comprimento de onda do fóton original.

Para a aplicação desta técnica, tipicamente, são utilizados dois tipos de cavidades ópticas passivas: na configuração linear com dois espelhos e na configuração em anel, tipicamente com quatro espelhos como mostra a figura 4.12.

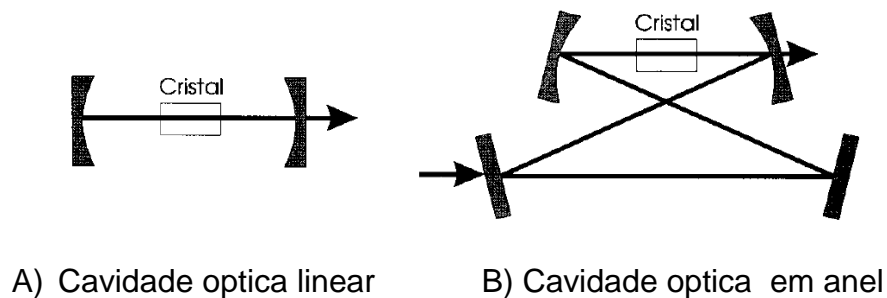


Fig.4.12 Tipos comuns de configurações de cavidades ópticas.

Neste projeto optou-se pela configuração em anel, composta de dois espelhos planos e dois espelhos curvos de raio 5 cm focalizando o feixe que percorre a cavidade em um cristal BBO (beta-bario borato) como mostra a figura 4.13.

Embora cristais duplicadores não sejam muito eficientes na duplicação em frequência, quando inserimos o cristal BBO na cavidade do laser [4], temos a vantagem de que dentro da cavidade a intensidade do laser é maior, o que implica que a taxa de conversão também aumentará em relação ao caso de colocado externamente à cavidade ou sem a cavidade. Desta forma, esperamos conseguir construir uma fonte de UV em 266 nm de potência elevada que permitirá uma série de experimentos no grupo de Lasers e Aplicações e posteriormente complementar alguns experimentos no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, que utilizem radiação UV.

O desenvolvimento deste sistema está em fase inicial e por isso ainda não temos nenhum resultado sobre a produção de radiação ultravioleta. Para obter estes dados é preciso otimizar o alinhamento dos espelhos, fazer o casamento de modos usando um par de lentes externas à cavidade, bem como implementar a técnica de estabilização ativa da cavidade, que para este caso será a técnica de Hänsch-Couillaud [5].

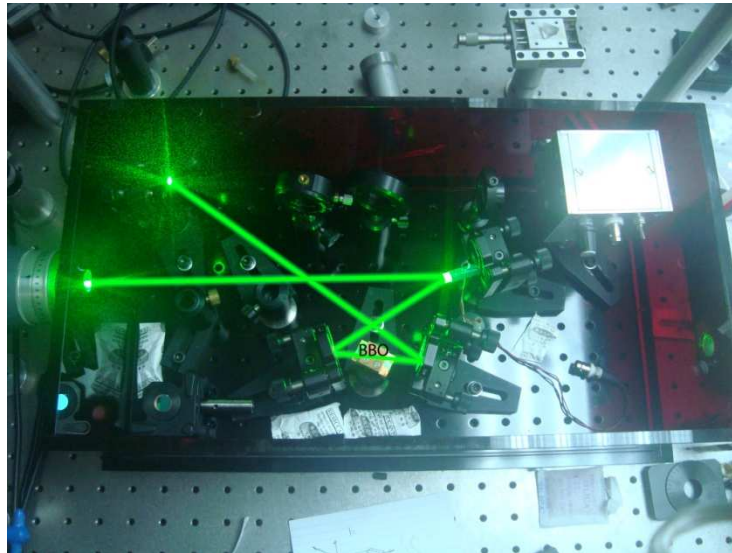


Fig 4.13 Montagem experimental da cavidade óptica para duplicar o laser de 532 nm usando um cristal de BBO.

## 2. Detecção da radiação ultra- violeta

A análise do espectro de emissão do cristal no ultravioleta, sem o uso da cavidade optica, foi feita usando o espectrômetro portátil Ocean Optics modelo HR4000 acoplado por uma fibra optica. A figura 4.14 mostra o pico no comprimento de onda 266 nm.

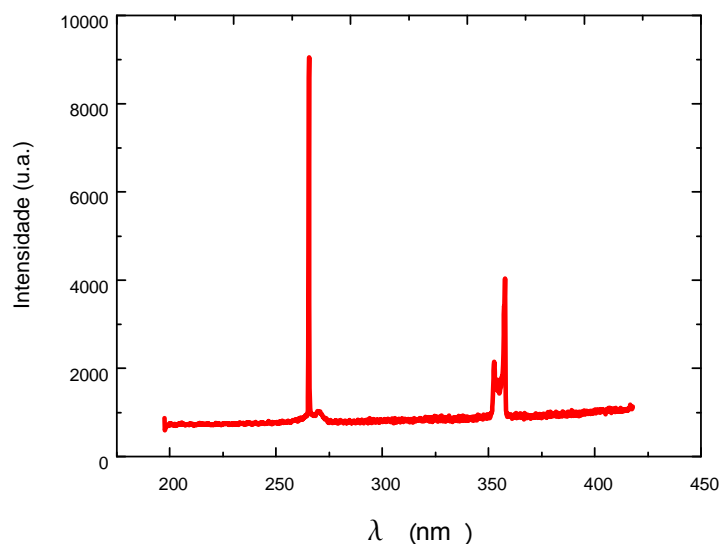


Fig 4.14 Espectro da radiação ultra-violeta gerado pela duplicação de frequência do verde

Também observa-se um pico em 351 nm que é ocasionado por um efeito de saturação do espectrômetro (fig 4.15).

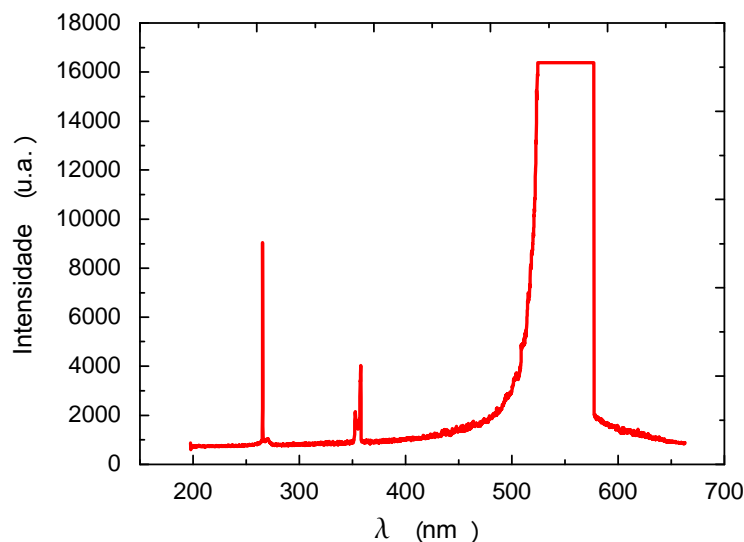


Fig 4.15 Espectro da radiação ultra-violeta (266 nm) gerada pela radiação em 532 nm. O pico em 351 nm é um artifício de medida gerado pela saturação do espectrômetro Ocean Optics.

## 5 Atividades Complementares

Sobre as participações em eventos, os resultados deste projeto, foram expostos no Congresso de Física da Matéria Condensada, de 10 à 14 de maio de 2010, em Águas de Lindóia –SP, com o título: **“Single-frequency UV laser radiation at 266 nm by second harmonic generation in an external optical cavity”**. Em anexo segue o resumo do trabalho apresentado.

## 6 Conclusão

Durante o semestre foi possível cumprir uma grande parte do cronograma inicial proposto para o projeto de iniciação científica. Não terminamos as atividades com a geração de radiação UV, porque houve um problema imprevisível com o cristal BBO.

Além das atividades obrigatórias da graduação, neste semestre frequentei as reuniões realizadas pelo Grupo de Lasers e Aplicações e em algumas delas fui palestrante, que deram grande contribuição à minha formação.

Do ponto de vista pessoal, neste semestre pude aprender um pouco sobre óptica não linear e a técnica de geração de segundo harmônico, que através delas adquiri um grande conhecimento na área de óptica, bem como na parte de instrumentação, pois trabalhei com diversos instrumentos tais como espectrômetro e medidores de potências.

## **6 Parecer do Orientador**

"O relatório descreve bem as atividades realizadas pela Bruna. Neste período ela estudou fundamentos de óptica não linear, particularmente geração de segundo harmônico, e realizou experimentos simples no laboratório envolvendo a geração de segundo harmônico de um laser Q-switched em 1064 nm, comparando a eficiência entre cristais de KTP e PPLN, utilizando casamento de fase crítico e quase-casamento de fase, respectivamente."

## **7 Referências**

- [1] P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters, and G. Weinreich, "Generation of optical harmonics". Phys. Rev. Lett. 7(1961) 118.
- [2] W. Demtröder, "Laser Spectroscopy", Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 1981
- [3] M. M. Fejer, "Nonlinear optical frequency conversion", Physics Today, May 1994.
- [4] L. S Cruz and F. C. Cruz, "External power-enhancement cavity versus intracavity frequency doubling of Ti:sapphire lasers using BIBO", Optics Express, 15, 11913 (2007).
- [5] T.W.Hänsch and B.Couillaud, "Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity", Opt.Commun., 35, 441-444 (1983).

## 8 Anexo

XXXIII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada / ID: 808-1 1

### **Single-frequency UV laser radiation at 266 nm by second harmonic generation in an external optical cavity**

Arline M. Melo

*BR Labs Ltda, Rua Lauro Vanucci 1020, 13087-548, Campinas, SP, Brazil*

Bruna Hota

*Gleb Wataghin Physics Institute, University of Campinas - UNICAMP, 13083-970, Campinas, SP, Brazil*

Marcos Moreira Jr

*BR Labs Ltda, Rua Lauro Vanucci 1020, 13087-548, Campinas, SP, Brazil*

Flavio C. Cruz

*Gleb Wataghin Physics Institute, University of Campinas - UNICAMP, 13083-970, Campinas, SP, Brazil*

*Powerful continuous-wave, single-frequency laser radiation in the UV region is desirable for many applications ranging from biology, atomic and molecular physics and chemistry. There are however a few available options, often with limitations in power or wavelength range and at high costs. Second harmonic generation of single-frequency lasers is a widely used method, but generally inefficient, leading to very low powers. In this work we describe a setup for generating single-frequency radiation by second harmonic generation in an external power enhancement cavity. We employed a 10 Watt single-frequency green laser at 532 nm to generate UV radiation at 266 nm using a nonlinear crystal. A 10-mm long, Brewster-cut, BBO crystal, cut for critical phase matching at room temperature is positioned inside an optical ring cavity consisting of two curved and two flat mirror. This cavity is then locked into resonance with the laser by the Hansch-Couillaud polarization technique. The intracavity green power is then enhanced to over 100 watts, greatly increasing the second harmonic efficiency. We will describe the setup, its optimization and report our current results. A goal of this work is to produce single-frequency UV laser radiation with powers in the Watt level. Other wavelengths can be generated similarly, with proper choice of crystal and optics.*