



Geração de Segundo Harmônico: um protótipo de baixo custo para a demonstração de um efeito óptico não linear

I. M. de Melo^{1*}, G. R. Lima¹, M. F. Coutinho²

¹Universidade Federal do Espírito Santo – UFES/Alegre

²Instituto Federal Fluminense – IFF/Guarus

*isabellamoraes-trabalhos@hotmail.com

Resumo

Palavras-chave: Geração de Segundo Harmônico, GSH, Óptica Não Linear, *Laser Pointer*.

1. Introdução

O ensino de óptica nos cursos de graduação, licenciatura ou bacharelado, baseia-se nos livros didáticos tradicionais de física básica, os quais abordam exclusivamente os conteúdos de óptica linear. Esses conteúdos são divididos em duas partes: óptica geométrica, que trata dos fenômenos relacionados à propagação retilínea da luz como reflexão e refração, e óptica física, que analisa os efeitos ondulatórios como interferência e difração da luz ^[1].

Desse modo, são excluídos temas interessantes e atuais como a óptica não linear, cujos princípios permitem compreender o funcionamento de dispositivos tecnológicos utilizados no cotidiano. A óptica não linear estuda os fenômenos decorrentes da interação da radiação com materiais anisotrópicos, nos quais as propriedades ópticas dependem da direção em que são medidas.

Para que os fenômenos não lineares sejam observados é necessário utilizar radiação eletromagnética de alta intensidade. Por essa razão, tais fenômenos só foram observados após a invenção do *laser* de Rubi em 1960 ^[2].

Em 1961, Franken e colaboradores realizaram um experimento no qual uma radiação de frequência (ω) e comprimento de onda (λ) incidia num cristal de quartzo. Para a surpresa dos pesquisadores, a radiação que saía do cristal era composta por duas frequências diferentes, uma igual ao feixe incidente (ω) e a outra com o dobro da frequência (2ω), que corresponde à metade do comprimento de onda ($\lambda/2$). Esse fenômeno foi denominado Geração de Segundo Harmônico (GSH), conhecido na literatura como o nascimento da óptica não linear ^[2].

O efeito de GSH em cristais não lineares pode ser compreendido a partir de um simples modelo matemático que utiliza funções trigonométricas ^[2]. Neste modelo, o campo elétrico ($\vec{E}(t)$) da radiação monocromática é descrito pela Eq. (1). Ao incidir no cristal, essa radiação provoca oscilações das cargas elétricas do meio, que são representadas pelo vetor densidade volumétrica de polarização ($\vec{P}(t)$), Eq. (2),

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$\vec{P}(t) = \epsilon_0 \chi^{(1)} \vec{E}_0 \cos(\omega t) + \left[\frac{\epsilon_0 \chi^{(2)}}{2} \vec{E}_0^2 (1 + \cos(2\omega t)) \right] \quad (2)$$



onde E_0 , ω , ϵ_0 , $\chi^{(1)}$ e $\chi^{(2)}$ representam, respectivamente, a amplitude do campo elétrico, a frequência angular, a permissividade elétrica no vácuo e as susceptibilidades elétricas de primeira e segunda ordem.

Cargas elétricas oscilantes produzem radiação eletromagnética na mesma frequência que oscilam. Na Eq. (2), o primeiro termo representa as cargas elétricas que oscilam na mesma frequência ω da radiação incidente, já o último termo mostra a existência de cargas elétricas que oscilam com frequência 2ω e, portanto, são as responsáveis pelo fenômeno de GSH [2].

A intensidade dos fenômenos ópticos lineares e não lineares são proporcionais aos valores de $\chi^{(1)}$ e $\chi^{(2)}$, respectivamente. Nos cristais a magnitude de $\chi^{(1)}$ é muito maior do que $\chi^{(2)}$, com isso, os efeitos ópticos lineares são mais evidentes, mesmo com baixa intensidade de radiação incidente. Devido ao valor reduzido de $\chi^{(2)}$, o fenômeno de GSH só pode ser observado a partir da incidência de radiação com alta intensidade, isto é, com elevado valor de E_0 .

Normalmente, a demonstração do fenômeno de GSH demanda laboratórios modernos com equipamentos de custo elevado que, somado à ausência do conteúdo de óptica não linear nos livros de física básica são fatores que limitam a formação acadêmica e impossibilitam que os alunos aprendam conceitos fundamentais para compreender o funcionamento de dispositivos ópticos modernos. Este cenário revela a importância de alternativas para a demonstração da GSH utilizando experimentos simples e de baixo custo.

O fenômeno de GSH é o princípio de funcionamento de *lasers* que utilizam a tecnologia DPSS (*Diode Pumped Solid State*). Recentemente, essa tecnologia foi introduzida em alguns *laser pointers*, um instrumento de baixo custo acessível à população. Os objetivos deste trabalho consistem em descrever o princípio de funcionamento de um *laser pointer* do tipo DPSS, bem como desenvolver um protótipo aberto deste dispositivo que permita a observação direta do fenômeno de GSH.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

Foram utilizados um *laser* DPSS, modelo 98000W ZOU, que emite radiação eletromagnética com comprimento de onda de 532 ± 10 nm (luz verde), uma *proto-board*, uma bateria recarregável de 3,7 V, um ferro de solda, uma lixa e uma serra para corte de metais.

2.2. Metodologia

O *laser* mostrado na Fig. (1) foi desmontado para a separação e identificação dos seus componentes ópticos internos, possibilitando a compreensão das suas funcionalidades.



Figura 1. *Laser pointer* do tipo DPSS.

A Fig. (2) exibe um diagrama esquemático da estrutura interna deste tipo de *laser*, usada como referência na identificação dos componentes ópticos. Basicamente, o dispositivo é constituído por uma bateria, um circuito de alimentação do diodo e um módulo DPSS.

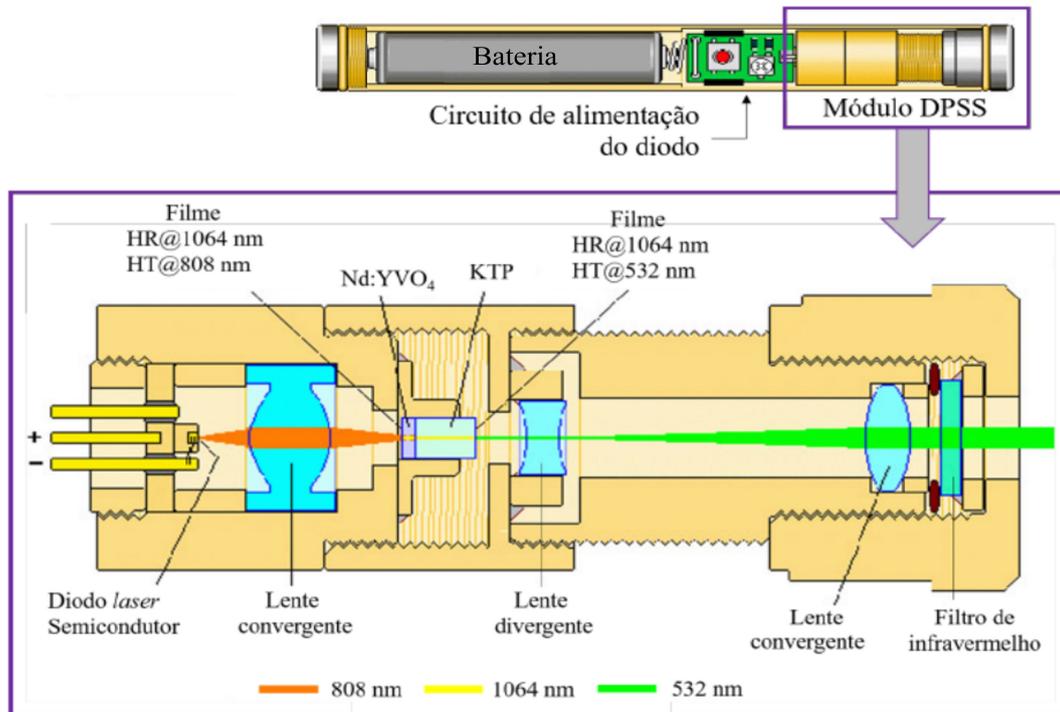


Figura 2. Diagrama interno do *Laser pointer* do tipo DPSS^[3].

O *laser* de diodo semicondutor emite radiação na faixa espectral do infravermelho (IV), com comprimento de onda de 808 nm. Esta radiação atravessa uma lente convergente e incide no cristal Nd:YVO₄ (Ortovanadato de Ítrio dopado com Neodímio), cuja face esquerda possui um filme fino de alta transmissão para 808 nm (HT@808 nm). A radiação de 808 nm é absorvida pelo cristal e produz transições eletrônicas que resultam na emissão de radiação no IV de 1064 nm.

O fenômeno de GSH acontece quando a radiação de 1064 nm incide no cristal KTP (Fosfato de Óxido de Titânio e Potássio), um sólido anisotrópico com propriedades ópticas não lineares. Como consequência, a radiação de saída do KTP passa a ser constituída por dois comprimentos de onda, um na faixa do IV (1064 nm) e o outro na faixa do visível (532 nm), que corresponde à metade de 1064 nm.

A face direita do cristal KTP possui um filme de alta reflexão para 1064 nm (HR@1064 nm), e alta transmissão para 532 nm (HT@532 nm). O objetivo deste filme é permitir a saída da luz verde e refletir para dentro do cristal KTP a radiação de 1064 nm. Como a face esquerda do cristal Nd:YVO₄ também possui um filme de alta reflexão para 1064 nm (HR@1064 nm), a radiação de 1064 nm fica confinada no interior dos cristais, um mecanismo que intensifica o efeito de GSH.

As lentes divergente e convergente são utilizadas para diminuir a divergência do feixe de luz verde. Por fim, o feixe atravessa um filtro de infravermelho que tem o objetivo de impedir que qualquer resíduo de radiação na faixa do IV saia do dispositivo.



3. Resultados e Discussão

A Fig. (3) mostra o protótipo construído sobre uma *protoboard* e uma ampliação na região dos cristais com o dispositivo desligado e ligado, respectivamente.

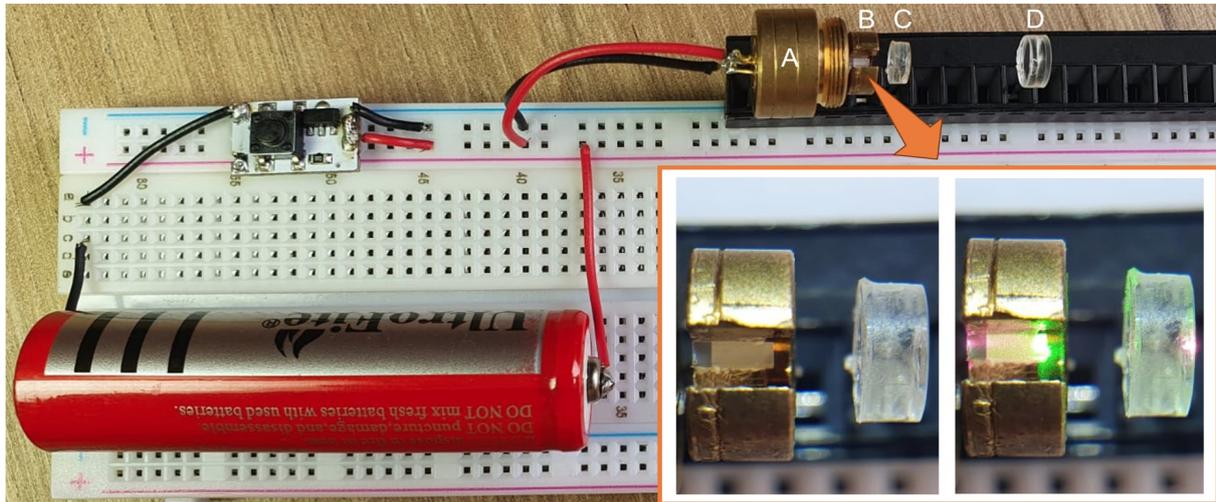


Figura 3. Protótipo construído para a demonstração da GSH.

Neste protótipo, a bateria e o circuito de alimentação do *laser* de diodo semiconductor foram conectados a uma *protoboard*. O componente óptico **A** contém no seu interior o *laser* de diodo semiconductor e uma lente convergente. O item **B** exhibe os dois cristais (Nd:YVO₄ e KTP), que podem ser vistos com mais detalhes na região ampliada. Os componentes **C** e **D** são as lentes divergente e convergente, respectivamente. O filtro infravermelho não foi encontrado na saída do dispositivo. É importante destacar que este componente é fundamental para evitar que qualquer radiação no IV saia do *laser pointer*, o que poderia causar danos à visão do usuário, mesmo estando equipado com óculos de proteção para a luz verde.

Com o protótipo ligado, pode-se observar claramente que uma luz avermelhada (808 nm), emitida pelo *laser* de diodo semiconductor, incide no primeiro cristal (Nd:YVO₄). Na sequência, uma luz verde (532 nm) é gerada pelo segundo cristal (KTP), uma demonstração direta do fenômeno de GSH.

4. Conclusões

Este trabalho descreveu o princípio de funcionamento de um *laser* DPSS e apresentou a construção de um protótipo portátil e de baixo custo para a demonstração de um efeito óptico não linear, a GSH. Espera-se que esse protótipo possa incentivar a discussão de tópicos atuais de óptica em sala de aula, garantindo uma formação acadêmica alinhada com as tecnologias aplicadas aos dispositivos presentes no cotidiano dos alunos.

Referências

- [1] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física, vol. 4: óptica e física moderna. 10ª edição. **Rio de Janeiro: Editora LTC**, 2016.
- [2] BOYD, Robert W. Nonlinear optics. **Academic press**, 2020.
- [3] AL MUSAWI, Mustafa S.; AL SUDANI, Ameen M. Evaluating the harmful effect of handheld commercial green laser pointer on retina at variable power and intervals of exposure: animal model. **Materials Today: Proceedings**, 2020.