



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA



CLEISSON ALMEIDA DA SILVA

**ABORDAGEM CLÁSSICA DA INTERAÇÃO LUZ-MATÉRIA PARA DESCREVER
O PROCESSO DE GERAÇÃO DE SEGUNDO-HARMÔNICO**

Maceió

2024

CLEISSON ALMEIDA DA SILVA

**ABORDAGEM CLÁSSICA DA INTERAÇÃO LUZ-MATÉRIA PARA DESCREVER
O PROCESSO DE GERAÇÃO DE SEGUNDO-HARMÔNICO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Instituto de Física da Universidade
Federal de Alagoas, para obtenção de grau em
Licenciatura em Física.

Orientador: Prof. Dr. André de Lima Moura

Maceió

2024

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

- S586a Silva, Cleisson Almeida da.
 Abordagem clássica da interação luz-matéria para descrever o processo de
 geração de segundo-harmônico / Cleisson Almeida da Silva. – 2024.
 25 f. : il.
- Orientador: André de Lima Moura.
 Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Física: licenciatura) –
 Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Física. Maceió, 2024.
- Bibliografia: f. 25.
1. Geração de segundo harmônico. 2. Interação luz-matéria. 3. Óptica não-
 linear. I. Título.

CDU: 535

FOLHA DE APROVAÇÃO

CLEISSON ALMEIDA DA SILVA

ABORDAGEM CLÁSSICA DA INTERAÇÃO LUZ-MATÉRIA PARA DESCREVER O PROCESSO DE GERAÇÃO DE SEGUNDO-HARMÔNICO

Trabalho de conclusão de
curso apresentado como requisito
para obtenção do grau de
licenciado em Física pela
Universidade Federal de Alagoas.



Documento assinado digitalmente

ANDRE DE LIMA MOURA

Data: 05/12/2024 17:18:34-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

PROF. ANDRE DE LIMA MOURA (IF-UFAL)



Documento assinado digitalmente

JEFFERSON FERREIRA DA SILVA

Data: 06/12/2024 06:27:24-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

PROF. JEFFERSON FERREIRA DA SILVA (SEDUC - AL)



Documento assinado digitalmente

TASSO DE OLIVEIRA SALES

Data: 09/12/2024 20:43:56-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

PROF. TASSO DE OLIVEIRA SALES (SEDUC - AL)

Dedico ao meu pai, Neurinaldo
E à minha mãe Maria Rizioneide.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por ter me concedido chegar até aqui.

Agradeço ao Prof. Dr. André de Lima Moura, pela oportunidade, pelos ensinamentos e pela orientação.

Ao Prof. Dr. Guilherme M.A. Almeida por toda orientação durante o período em que estive como coordenador do curso.

Ao meu pai, Neurinaldo Ferreira da Silva (in memoriam), por todos os ensinamentos, por todos os “serões” e por todos os motivos os quais não caberiam aqui.

À minha mãe Maria Rizioneide Almeida da Silva por todos os sacrifícios realizados.

Aos meus irmãos, Jean e Luan, por todo o companheirismo ao longo da vida.

Aos meus amigos Ivanilson da Silva Bezerra e Yan Guilherme Siqueira (“É um prazer inenarrável”) por dividirem o fardo.

Agradeço a todos os amigos do Instituto de Física. (Abdon, Lara, Matheus, Lucas, Rivaldo e Cecília)

Agradeço a professora Eunice Mendonça, da E.M. Prof.^a Marinete Neves, por todo o incentivo, apoio e por ter acreditado em mim.

Agradeço ao amigo Flávio de Oliveira Silva D’Amato pela parceria desde o início do curso e pela inspiração durante todo o restante desse período.

Agradeço a todos os professores que compõem o corpo docente do Instituto de Física da UFAL.

Aos amigos Aristóteles Limeira Júnior (Ary), Suelene Vieira e Lucas (Arapiraca Jr.).

Às minhas cunhadas Janaína Ferreira da Silva e Sara da Silva Félix.

Ao Padre Felipe Melo, da Quase Paróquia Nossa Senhora do Sorriso e São Francisco de Assis, no Benedito Bentes.

Agradeço ao Prof. Dr. Ueslen Rocha, por todo o incentivo.

RESUMO

Durante muito tempo, o estudo da interação luz-matéria resumiu-se a fenômenos ópticos lineares (àqueles em que a polarização é diretamente proporcional ao campo elétrico da luz incidente). Entretanto, em meados do século XX, com o desenvolvimento da luz laser (luz de alta intensidade) por Theodore Maiman e posteriormente com os experimentos de Peter A. Franken isso mudou.

Franken observou em um de seus experimentos que ao incidir uma fonte de radiação com frequência (ω) e comprimento de onda (λ) sobre um cristal, a radiação que saía do mesmo 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 não era esperado, tendo em vista que não satisfaz a linearidade dos fenômenos ópticos até então conhecidos. Tal fenômeno recebeu o nome de Geração de Segundo Harmônico (SGH, do inglês Second Harmonic Generation) e marcou o início do estudo da óptica não-linear, que estudaremos neste trabalho.

Palavras-Chave: Geração de Segundo Harmônico (SGH), Interação luz-matéria, Óptica não-linear

ABSTRACT

For a long time, the study of light-matter interaction was limited to linear optical phenomena (those in which polarization is directly proportional to the electric field of the incident light). However, in the mid-20th century, with the development of laser light (high-intensity light) by Theodore Maiman and later with the experiments of Peter A. Franken, this changed.

Franken observed in one of his experiments that when a radiation source with frequency (ω) and wavelength (λ) was incident on a crystal, the radiation that emerged from it was composed of two different frequencies, one equal to the incident beam (ω) and the other with twice the frequency (2ω), which corresponds to half the wavelength ($\lambda/2$). This phenomenon was unexpected, given that it does not satisfy the linearity of the optical phenomena known until then. This phenomenon was called Second Harmonic Generation (SGH) and marked the beginning of the study of nonlinear optics, which we will study in this work.

Keywords: Second Harmonic Generation (SGH), Light-matter interaction, Nonlinear optics.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
2. CONTEXTO HISTÓRICO	10
3. A INTERAÇÃO LUZ-MATÉRIA.....	11
3.1 FENÔMENOS ÓPTICOS LINEARES	11
3.1.1 REFLEXÃO	12
3.1.2 REFRAÇÃO	14
3.1.3 ABSORÇÃO	15
3.2 FENÔMENOS ÓPTICOS NÃO-LINEARES	16
4 GERAÇÃO DE SEGUNDO HARMÔNICO (SHG).....	17
5 LASER.....	19
6 METODOLOGIA	19
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
8 CONCLUSÃO	23
REFERÊNCIAS.....	24

1. INTRODUÇÃO

A interação entre luz e matéria constitui um tema de grande importância na física e na ciência dos materiais, pois possibilita a compreensão e a manipulação das propriedades ópticas essenciais. No início, as pesquisas nesse campo focaram nas definições impostas pela óptica linear, na qual a polarização do material está diretamente relacionada ao campo elétrico da luz que incide sobre ele. Essa perspectiva linear é adequada para condições de baixa intensidade luminosa, como ocorre com fontes naturais ou iluminação tradicional. No entanto, com a invenção do laser por Theodore Maiman em 1960, surgiu a oportunidade de investigar regimes de alta intensidade, revelando novas características que vão além da linearidade da óptica clássica.

Um momento significativo nesse cenário foi o experimento conduzido por Peter A. Franken, que revelou a ocorrência da Geração de Segundo Harmônico (SGH). Este fenômeno, que se caracteriza pela emissão de luz com o dobro da frequência do feixe que incide, não pode ser compreendido através do formalismo linear, dando assim origem à área da óptica não linear. A SGH passou a ser um exemplo fundamental de como sistemas ópticos se comportam de forma complexa quando expostos a campos intensos, evidenciando o papel essencial da não linearidade nos materiais.

Outro conceito essencial para compreender essas interações é o do oscilador harmônico simples, utilizado para modelar o comportamento de átomos e moléculas sob ação de campos elétricos. No regime linear, a resposta do oscilador é proporcional à força restaurada, produzindo um movimento regular. Entretanto, no regime não linear, o sistema se desvia dessa simplicidade, introduzindo respostas mais ricas e complexas, como a geração de harmônicos superiores, espalhamento não linear e efeitos dependentes da intensidade do campo incidente.

2. CONTEXTO HISTÓRICO

A relação entre a luz e a matéria tem sido um tema essencial nas áreas da física e química desde os primórdios da óptica clássica, recebendo importantes contribuições de cientistas como Isaac Newton e James Clerk Maxwell. O avanço da eletrodinâmica clássica no século XIX representou um ponto crucial, fundamentando a compreensão das ondas eletromagnéticas e sua interação com diferentes materiais.

No final do século XVII, Isaac Newton sugeriu que a luz era formada por partículas, enquanto Christiaan Huygens defendia uma abordagem ondulatória. Avançando para o início do século XIX, os experimentos realizados por Thomas Young sobre interferência confirmaram a natureza ondulatória da luz. Posteriormente, as equações elaboradas por James Clerk Maxwell entre 1861 e 1862 solidificaram a compreensão da luz como uma onda eletromagnética, permitindo uma análise mais aprofundada sobre como os campos elétricos e magnéticos interagem com a matéria. Essas teorias possibilitaram a explicação de fenômenos como reflexão, refração, absorção e dispersão da luz em diferentes materiais. Contudo, a investigação sobre uma interação não linear entre a luz e a matéria só foi iniciada no século XX, com o surgimento de fontes intensas de luz, como os lasers.

A invenção do laser em 1960, realizada por Theodore Maiman, transformou radicalmente a pesquisa sobre a interação entre luz e matéria. A intensa coerência e a elevada intensidade do feixe laser permitiram a análise de fenômenos que não podiam ser compreendidos através da óptica linear, na qual a resposta dos materiais é diretamente proporcional ao campo elétrico que lhes é aplicado.

Em 1961, Franken e colaboradores realizaram um experimento que consistia em incidir sobre um cristal de quartzo, uma fonte de radiação com frequência (ω) e comprimento de onda (λ). 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 recebeu o nome de Geração de Segundo Harmônico (SGH, do inglês Second Harmonic Generation), conhecido na literatura como o início da óptica não linear.

3. A INTERAÇÃO LUZ-MATÉRIA

A abordagem clássica para a interação luz-matéria é baseada na descrição do comportamento do campo elétrico da luz em interação com os dipolos elétricos induzidos no material. O material é descrito em termos de sua polarização (P), que é a resposta do material ao campo elétrico (E) da luz. A relação entre a polarização (P) e o campo elétrico (E) pode ser expressa matematicamente como:

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

- P é a polarização elétrica (C/m^2).
- (ϵ_0) é a permissividade elétrica do vácuo. (F/m)
- X é a suscetibilidade elétrica de primeira ordem (adimensional), que caracteriza a resposta linear do material ao campo elétrico.
- E : Campo elétrico (V/m).

3.1 FENÔMENOS ÓPTICOS LINEARES

São chamados fenômenos ópticos lineares as interações entre luz e um material quaisquer em que a resposta do material é diretamente proporcional a intensidade do campo elétrico da luz incidente (E_0). Nesses casos, as propriedades ópticas do material, como índice de refração (fenômeno em que a radiação incidente sofre uma mudança de meio) e absorção, não dependem da intensidade da luz. Basicamente, nesse tipo de fenômeno óptico, a interação entre a luz e o material segue o descrito na equação 1.

Para exemplificar esses fenômenos, podemos citar a reflexão, refração, a absorção, entre outros fenômenos ópticos. As principais características desses fenômenos são:

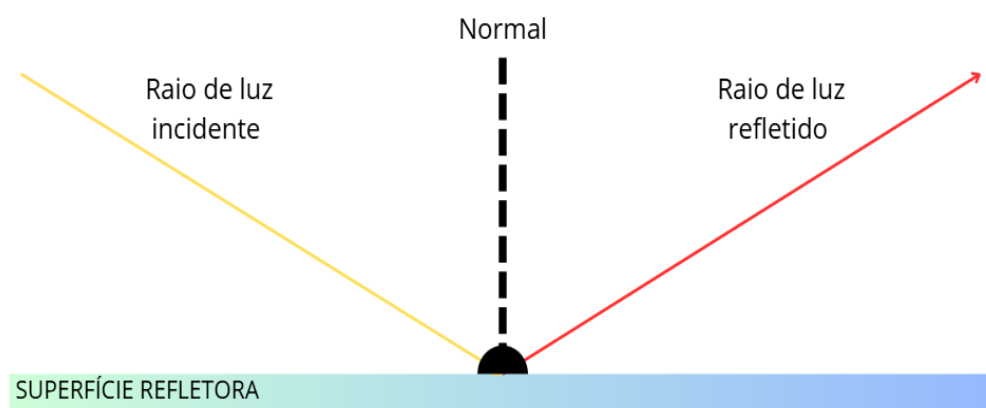
- Propriedades ópticas constantes: o índice de refração (n) e o coeficiente de absorção (α) permanecem constantes e independem da intensidade da luz.
- Regime de baixa intensidade: fenômenos ópticos lineares ocorrem, predominantemente, quando a intensidade da luz é baixa.
- Proporcionalidade direta: a polarização induzida no material é linearmente proporcional ao campo elétrico da luz, seguindo o descrito pela equação 1 acima.

Em outras palavras, nos fenômenos ópticos lineares a interação luz-matéria, segue o esperado, sem a necessidade de termos adicionais à equação 1, para descrever seus resultados. Entretanto, quando utilizamos luz de alta intensidade, precisamos realizar uma expansão da equação 1, adicionando termos para descrever o fenômeno, que passa a ser tido como não-linear.

3.1.1 REFLEXÃO

A reflexão é o fenômeno físico no qual a luz, ao incidir sobre uma superfície, retorna ao meio de origem. Esse fenômeno ocorre devido à interação das ondas eletromagnéticas com os átomos ou moléculas do material, que reemitem a luz em determinadas direções.

Figura 1 - representação geométrica da reflexão da luz em espelhos.



Fonte: autor, 2024.

A luz é uma onda eletromagnética, como estabelecido por Maxwell. Toda onda eletromagnética é composta por dois campos oscilantes, um elétrico (E) e outro magnético (B).

Quando uma onda eletromagnética atinge a superfície de um material ocorre uma interação com as partículas do material, principalmente com os elétrons dos átomos. Essa interação pode ser compreendida em três etapas principais, que são:

- Interação da luz com a matéria:

O campo elétrico oscilante da luz exerce uma força sobre os elétrons das moléculas ou átomos do material, fazendo com que eles oscilem em resposta. Essa oscilação é proporcional à frequência da luz incidente.

- Reemissão de ondas

Os elétrons oscilantes se comportam como pequenas antenas que reemitem ondas eletromagnéticas em todas as direções. Este é um processo de reemissão da energia da luz. A luz refletida é o resultado da reemissão coerente das ondas por muitos átomos da superfície.

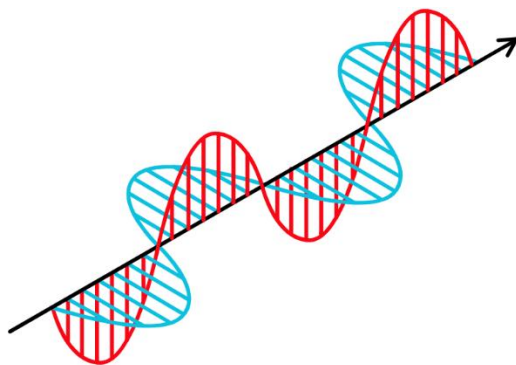
A coerência ocorre porque as ondas reemitidas interferem construtivamente em uma direção específica. No caso de superfícies lisas, a interferência resulta em um feixe de luz refletido bem definido (reflexão especular). Em superfícies rugosas, as reemissões são desordenadas, causando reflexões difusas.

- Direções específicas da luz refletida

A direção da luz refletida é consequência da interferência construtiva das ondas reemitidas, a interferência é determinada pelas condições de fase das ondas reemitidas. A geometria da superfície e o ângulo de incidência da luz determinam as direções preferenciais.

Esse comportamento segue diretamente as leis de Maxwell, que descrevem como as ondas eletromagnéticas interagem com a matéria e como as condições de continuidade nos campos (elétrico e magnético) na interface dos materiais impõem restrições à propagação da luz.

Figura 2: representação de uma onda eletromagnética.



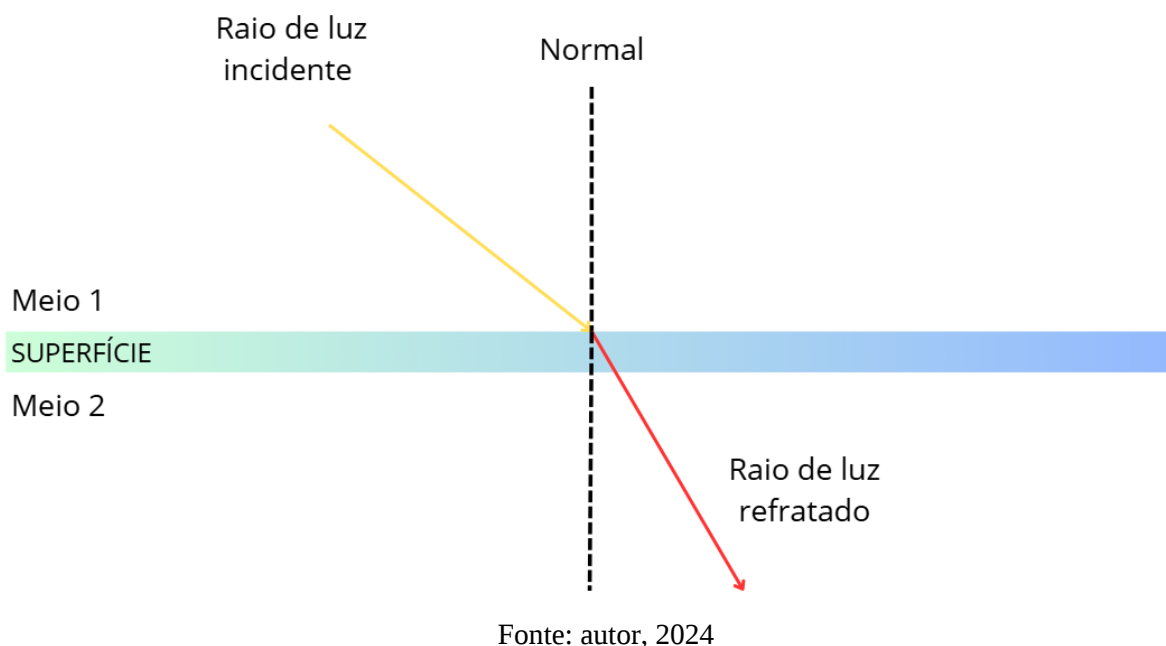
Fonte: autor, 2024

3.1.2 REFRAÇÃO

A refração é o fenômeno físico no qual uma onda, ao passar de um meio para outro com diferentes propriedades ópticas (índice de refração), muda sua velocidade e, conseqüentemente, sua direção de propagação (exceto no caso de incidência perpendicular). Esse comportamento também é resultado da interação entre a onda eletromagnética e as partículas do material, que influenciam a velocidade de propagação da luz.

Quando a luz incide sobre a superfície de um meio com índice de refração diferente daquele pelo qual ela transita, ocorre uma mudança de meio, tal fenômeno se dá porque a velocidade com que a luz se move no novo meio (que possui índice de refração diferente) sofre alterações. Conforme a ilustração a seguir:

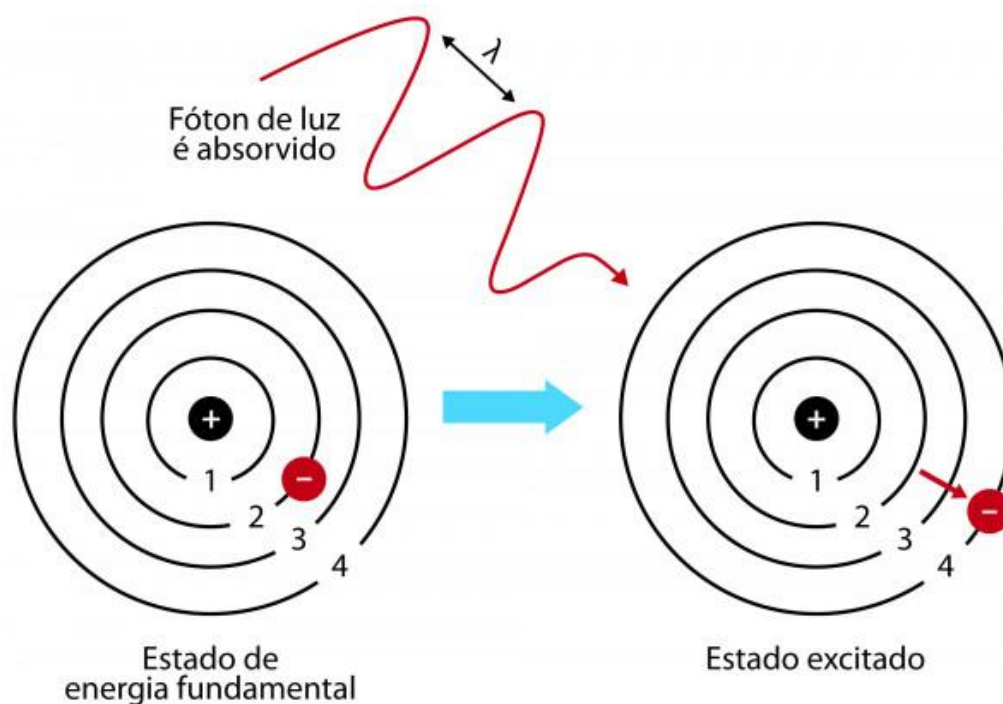
Figura 3: representação geométrica do fenômeno da refração.



3.1.3 ABSORÇÃO

O fenômeno óptico da absorção ocorre quando a radiação que incide sobre um material tem parte de sua energia transferida para os átomos ou moléculas que compõem esse material. Essa transferência de energia resulta em uma diminuição da intensidade da radiação incidente e, em muitos casos, em uma excitação dos átomos ou moléculas do material. A absorção ocorre em nível atômico e molecular, e os mecanismos envolvidos dependem de alguns fatores, como a natureza da radiação e as propriedades do material.

Figura 4: representação do processo de absorção de um fóton por um átomo no estado fundamental.



Fonte: Adaptada, fundação CECIERJ, acesso em: <<https://canal.cecierj.edu.br/recurso/17625>>

3.2 FENÔMENOS ÓPTICOS NÃO-LINEARES

Quando a interação luz-matéria não segue o comportamento esperado, isto é, a resposta do material à luz deixa de ser proporcional à intensidade da luz incidente, temos um fenômeno óptico não-linear. Esses fenômenos ocorrem em intensidades de luz muito altas, como a luz laser.

Por tanto, as propriedades ópticas não-lineares dos materiais dielétricos são observadas com interação entre luz de alta intensidade e o meio. Para entendermos como esses sistemas respondem a essa interação vamos considerar que essa resposta é dada pelos elétrons da camada de valência dos átomos.

Quando a intensidade da luz aumenta consideravelmente, a resposta do material muda, as propriedades ópticas do material, como índice de refração e de polarização induzida, passam a depender da intensidade da luz. A polarização (P) do material deixa de ser proporcional ao campo elétrico e termos mais altos são necessários para descrevê-los:

$$P = \epsilon_0 \chi^1 E + \epsilon_0 \chi^2 E^2 + \epsilon_0 \chi^3 E^3 + \dots \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

- ϵ_0 : permissividade do vácuo.
- χ^1, χ^2, χ^3 : Suscetibilidades elétricas de diferentes ordens.

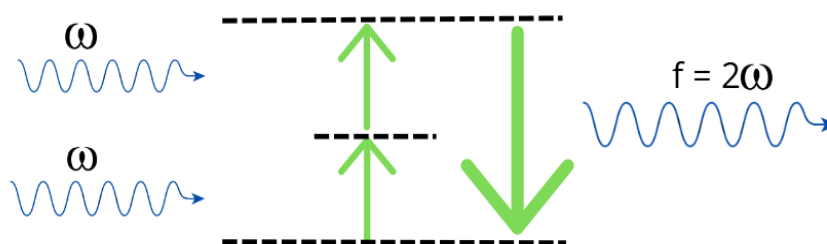
Comparando as equações (1) e (2), percebemos que foram adicionados termos de ordem superior, χ^2 e χ^3 , que representam as susceptibilidades dos termos não lineares da interação entre o material e a luz. Já os termos E^2 e E^3 , na expressão representam termos de ordem superior na resposta do material ao campo elétrico E.

A presença do termo E^2 representa uma resposta não linear ao campo elétrico (E), mas sim uma resposta quadrática, onde ocorre o fenômeno denominado Geração de Segundo Harmônico (**SHG**, do inglês Second Harmonic Generation).

4 GERAÇÃO DE SEGUNDO HARMÔNICO (SHG)

A Geração de Segundo Harmônico é um processo não linear que ocorre quando um material, definido por sua polarização (P), interage com o campo elétrico (E) de uma luz de alta intensidade, com frequência fundamental ω e comprimento de onda λ , gerando uma onda de frequência duas vezes maior (2ω) e comprimento de onda $\lambda/2$. Neste processo, dois fótons com frequência ω de luz incidente interagem, formando um único fóton com frequência 2ω . Conforme ilustração a seguir:

Figura 5: Dois fótons com frequência ω se chocam gerando um único fóton de frequência 2ω



Fonte: autor, 2024

A SHG ocorre em materiais não lineares, ou seja, materiais cuja as propriedades ópticas não obedecem a uma relação linear entre a intensidade do campo elétrico e a polarização causada no material. No caso da SHG, a polarização do material depende do quadrado do campo elétrico aplicado.

Em materiais não lineares, a polarização (P) é uma função não linear do campo elétrico (E). Em vez de ser diretamente proporcional a E , a polarização também inclui termos de ordem superior, como visto na Equação 2.

Para entendermos melhor esse processo devemos considerar que a SHG está intimamente relacionada a um comportamento oscilatório e pode ser relacionado à equação do oscilador harmônico simples, que descreve o movimento periódico. Partindo da equação do oscilador harmônico simples a seguir:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0 \quad \text{Eq. (3)}$$

- $x(t)$: deslocamento da partícula ou amplitude da onda;
- ω_0 : frequência angular natural do oscilador.

A solução geral para essa equação é uma função senoidal ou cossenoidal, como:

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t) + B \sin(\omega_0 t) \quad \text{ou} \quad x(t) = A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t$$

Onde A e B são constantes determinadas pelas condições iniciais. O oscilador harmônico simples descrito acima é linear, o que significa que a frequência da oscilação é única (ω_0). Em sistemas ópticos não-lineares, a resposta do sistema não é linearmente proporcional ao estímulo, e a equação de movimento se modifica para incluir termos não-lineares:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x + \beta x^2 + \gamma x^3 + \dots = 0 \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde: β e γ são coeficientes que caracterizam a não-linearidade.

Na SGH, a resposta do sistema a uma onda incidente $E(t) = E_0 \cos(\omega t)$, inclui um termo que depende do quadrado da amplitude do campo elétrico. Em materiais não-lineares, a polarização do material é descrita como:

$$P = \epsilon_0 \chi^1 E + \epsilon_0 \chi^2 E^2 + \epsilon_0 \chi^3 E^3 + \dots \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

- χ^1 : suscetibilidade linear;
- χ^2 : coeficiente que dá origem à GSH.

O termo $\chi^2 E^2$ gera componentes de frequência 2ω , correspondendo ao segundo harmônico. Analogamente ao oscilador harmônico simples, a não-linearidade cria modos adicionais (harmônicos). Podemos concluir que quando introduzimos uma não-linearidade (χ^2 ou β, γ) no oscilador, aparecem termos que resultam em frequências adicionais, como 2ω .

Deste modo, podemos assumir que a SHG é um efeito não-linear que pode ser interpretado como o segundo modo harmônico de uma interação não-linear, similar à solução não-linear de um oscilador harmônico.

5 LASER

O laser, segundo Silva, é um fenômeno físico que envolve grande intensidade de luz produzida por fenômenos de amplificação dentro de uma cavidade com um ensemble de íons. A palavra laser é uma sigla cuja tradução direta significa amplificação da luz por emissão estimulada de radiação.

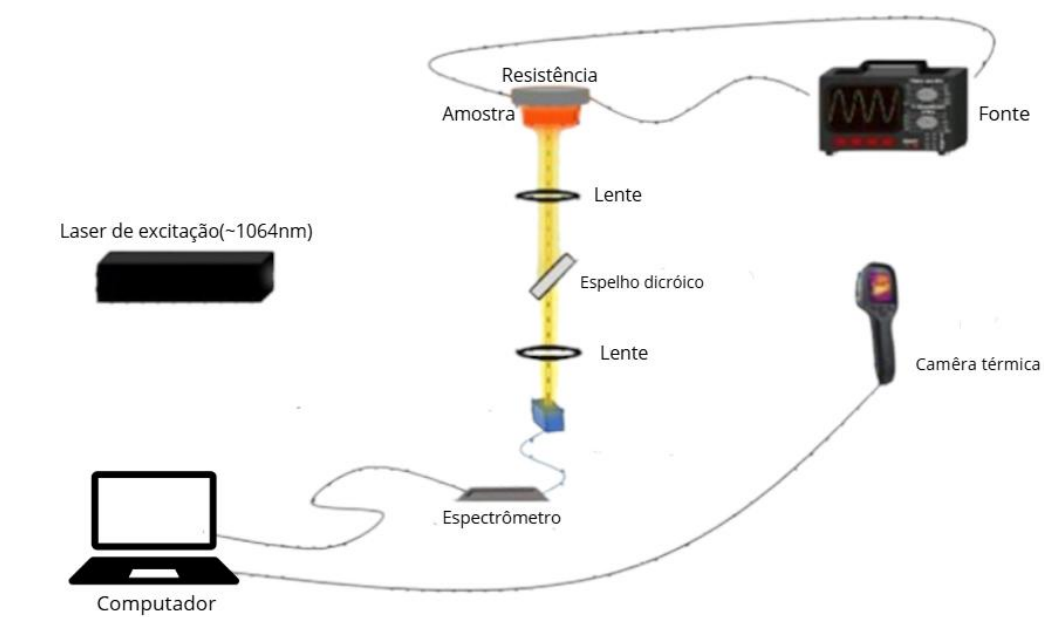
6 METODOLOGIA

Para demonstração da Geração de Segundo Harmônico foi realizado o processo de excitação de uma amostra de $\text{YAl(BO}_3)_4$, conforme a figura 6. A configuração experimental utilizada é representada na Figura 5. O experimento foi montado utilizando uma configuração na vertical com auxílio de um espelho dicróico, e consistiu em aquecer as nanopartículas com uma resistência controlada por uma fonte de tensão elétrica.

O tempo de aquisição foi de 0,3 segundos. Ao atingir a temperatura esperada o feixe do laser foi desbloqueado e focalizado na amostra com auxílio de uma lente com 10 cm de distância focal. A evolução do espectro fotoluminescente foi observada com auxílio de um espectrofotômetro acoplado com uma câmera ccd (charge-coupled device) a qual permitia realizar medidas simultâneas de 360 nm a 1180 nm. Uma lente de 5 cm de distância focal foi usada para focalizar a luz emitida pela amostra na fibra ótica.

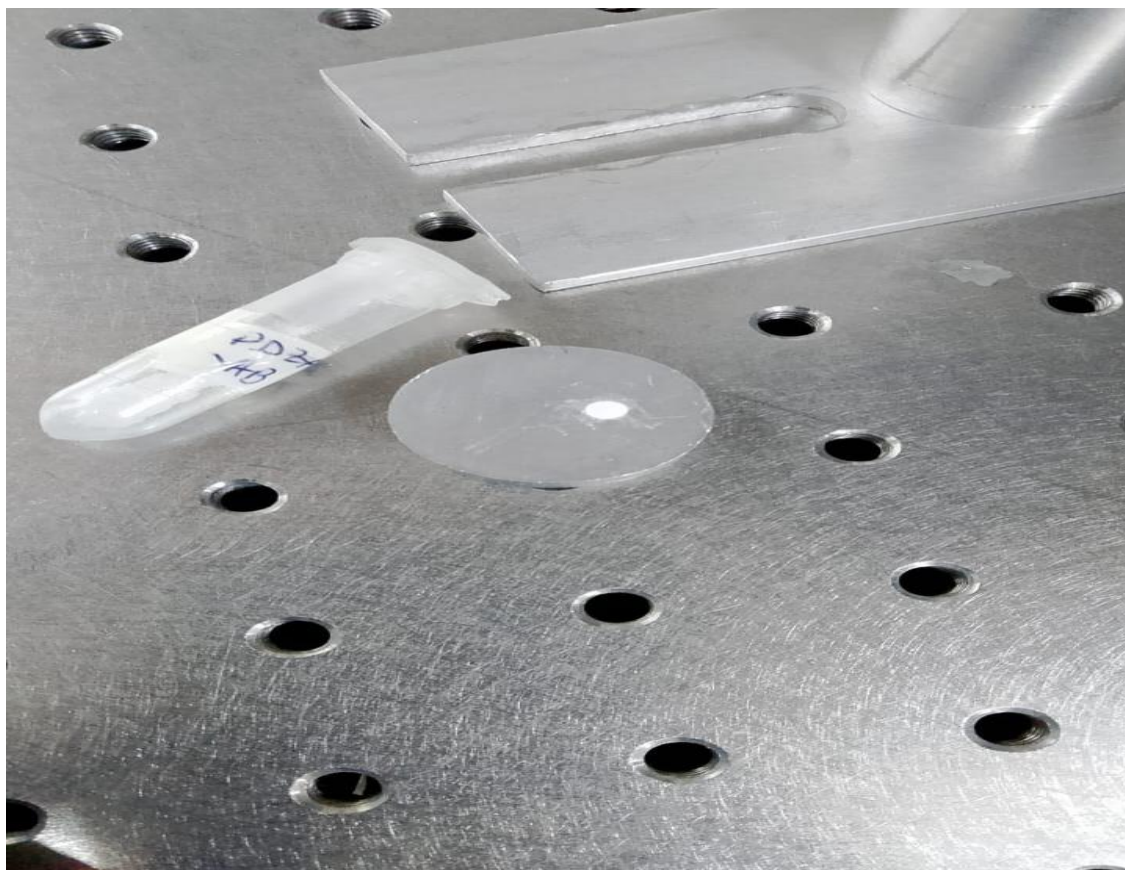
O laser foi direcionado à amostra fazendo com ocorresse a interação luz-matéria entre a luz de alta intensidade (laser) e o material, durante esse processo parte da energia é absorvida pelos átomos através do processo denominado de absorção. Quando os fótons da luz incidente interagem com os elétrons das camadas mais externas do átomo da amostra, parte da sua energia é absorvida fazendo com que a amostra seja excitada, isto é, saiam do seu estado fundamental, para um novo estado excitado.

Figura 5: Arranjo experimental utilizado para Geração de Segundo Harmônico



Fonte: Silva, 2021

Figura 6: Amostra de $\text{YAl(BO}_3)_4$.

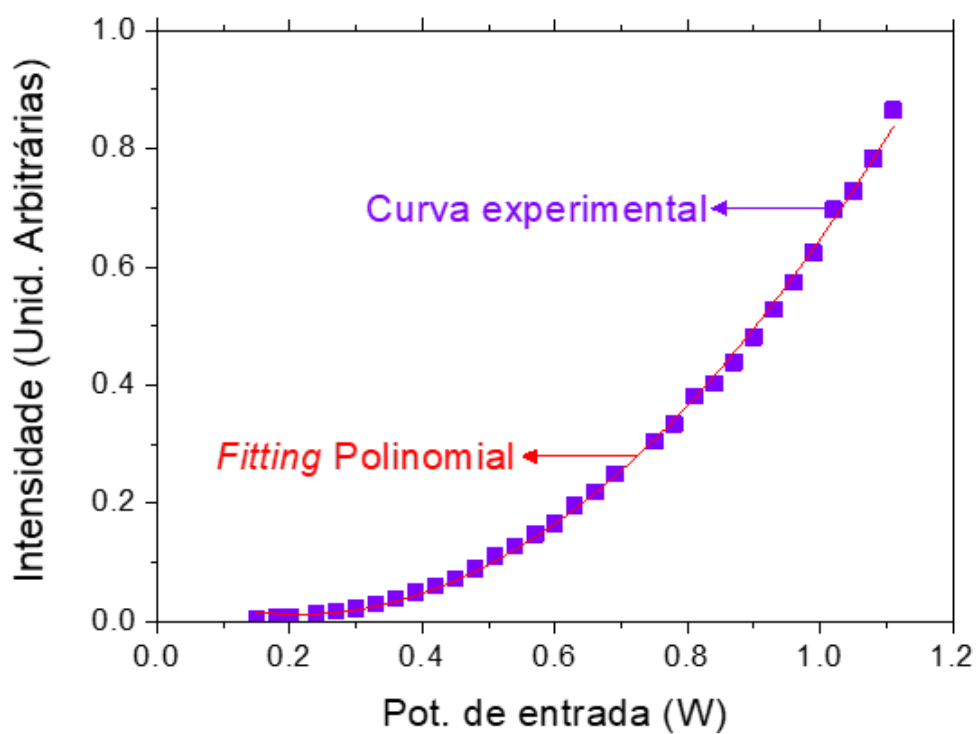


Fonte: O autor, 2024

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o experimento, uma fonte de luz laser foi direcionada através de espelhos e lentes para a amostra de $\text{YAl(BO}_3)_4$, com intuito de verificar o processo de Geração de Segundo Harmônico. Como vimos anteriormente, nesse processo, a radiação (luz) incidente tem sua frequência aumentada em duas vezes, isso faz com que a luz emitida seja mais intensa. Desse modo, é esperado que o comprimento de onda da luz incidente caia pela metade.

Nesse caso, a dependência entre a polarização e o campo elétrico da luz incidente é quadrática, ou seja, cresce de maneira exponencial com o dobro da frequência. Para realização do experimento realizamos a excitação da amostra, como explicado acima, utilizando um laser. Foram realizadas 60 medidas com diferentes valores para a potência de entrada e o seguinte gráfico foi obtido:



A curva experimental demonstra os resultados esperados, uma vez que a intensidade apresenta um crescimento exponencial à medida que a potência de entrada varia. Evidenciando a proporcionalidade quadrática entre a intensidade e a potência de entrada.

8 CONCLUSÃO

Neste trabalho, abordamos o processo de Geração de Segundo Harmônico, bem como suas características, tanto do ponto de vista teórico, como através da análise dos resultados experimentais. O estudo demonstrou que a SHG inerentes a materiais com suscetibilidade elétrica de segunda ordem e sua ocorrência depende diretamente da interação entre o campo elétrico incidente e as propriedades cristalinas do material.

Os resultados obtidos corroboram os princípios teóricos apresentados. A análise mostrou que a eficiência do processo de GSH aumenta significativamente em materiais com alta susceptibilidade, demonstrando a importância do alinhamento entre o feixe incidente e as propriedades ópticas do cristal. O espectro de frequência confirma a presença de um componente com o dobro da frequência da onda incidente (2ω), validando a geração de segundo harmônico.

A dependência da intensidade do segundo harmônico em relação à potência do feixe incidente segue o comportamento esperado de proporcionalidade quadrática, conforme previsto pela teoria.

Por fim, os resultados experimentais não apenas validaram o modelo teórico da GSH, mas também evidenciaram seu potencial para aplicações práticas, como em lasers inovadores, óptica não linear e tecnologias baseadas em controle de frequências de luz.

REFERÊNCIAS

- FRANKEN, P. A. et al. Generation of optical harmonics. *Physical Review Letters*, v. 7, n. 4, p. 118, 1961.
- M. Guignard e colaboradores, **High second-order nonlinear susceptibility induced in chalcogenide glasses by thermal poling**, *Opt. Exp.* 14, 1524 (2006).
- P. G. Kazansky e colaboradores, **Ultraviolet poling of pure fused silica by high-intensity femtosecond variation**, *App. Phys. Lett.* 86, 071106 (2005).
- SILVA, Rodrigo Ferreira da, **Operação e caracterização de lasers para estudos de fenômenos lineares e não-lineares acerca de processos envolvendo avalanche de fótons**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS.
- Y. Quiquempois, **Création et caractérisation d'un susceptibilité d'ordre deux les verres massifs et dans les fibres optiques à base de silice**, tese de Ph.D., Université des sciences et technologies de Lille (1999).
- Y. Quiquempois, N. Godbout e S. Lacroix, **Model of charge migration during thermal poling in silica glasses: Evidence of a voltage threshold for the onset of a second-order nonlinearity**, *Phys. Rev. A* 65, 43816 (2002).