

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**Akina Karen Yoshioka
Rafael Albuquerque dos Santos
William Koji Yonamine**

**DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MARCAÇÃO
COLORIDA A LASER DE TI:SAFIRA
FEMTOSSEGUNDO POR MEIO DA FORMAÇÃO DE
NANOESTRUTURAS PERIÓDICAS (*RIPPLES*) EM
SUPERFÍCIES METÁLICAS**

São Carlos

2018

**Akina Karen Yoshioka
Rafael Albuquerque dos Santos
William Koji Yonamine**

**DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MARCAÇÃO
COLORIDA A LASER DE TI:SAFIRA
FEMTOSSEGUNDO POR MEIO DA FORMAÇÃO DE
NANOESTRUTURAS PERIÓDICAS (*RIPPLES*) EM
SUPERFÍCIES METÁLICAS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Jarbas Caiado de Castro Neto

**São Carlos
2018**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues
Fontes da EESC/USP

Y65d Yoshioka, Akina Karen
Desenvolvimento do sistema de marcação colorida a laser de TI : safira femtossegundo por meio da formação de nanoestruturas periódicas (Ripples) em superfícies metálicas / Akina Karen Yoshioka, Rafael Albuquerque dos Santos, William Koji Yonamine; orientador Jarbas Caiado de Castro Neto. -- São Carlos, 2018.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Femtossegundos. 2. Laser. 3. Pulsado. 4. Marcação. 5. Colorida. I. Yoshioka, Akina Karen. II. Santos, Rafael Albuquerque dos. III. Yonamine, William Koji. IV. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Akina Karen Yoshioka

Título: "Desenvolvimento do sistema de marcação colorida a laser de Ti:Safira femtossegundo por meio da formação de nanoestruturas periódicas (RIPPLES) em superfícies metálicas"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 23/11/2018,

com NOTA 9,2 (nove, dois), pela Comissão Julgadora:

Prof. Titular Jarbas Caiado de Castro Neto - Orientador - FCM/IFSC/USP

Dra. Fatima Maria Mitsue Yasuoka - Pesquisadora - BR Labs Tecnologia Óptica e Fotônica

Prof. Associado Evandro Luis Linhari Rodrigues - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Rafael Albuquerque dos Santos

Título: "Desenvolvimento do sistema de marcação colorida a laser de Ti:Safira femtossegundo por meio da formação de nanoestruturas periódicas (RIPPLES) em superfícies metálicas"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 23 / 11 / 2018,

com NOTA 9,2 (nove, dois), pela Comissão Julgadora:

Prof. Titular Jarbas Caiado de Castro Neto - Orientador - FCM/IFSC/USP

Dra. Fatima Maria Mitsue Yasuoka - Pesquisadora - BR Labs Tecnologia Óptica e Fotônica

Prof. Associado Evandro Luís Linhari Rodrigues - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: William Koji Yonamine

Título: "Desenvolvimento do sistema de marcação colorida a laser de Ti:Safira femtossegundo por meio da formação de nanoestruturas periódicas (RIPPLES) em superfícies metálicas"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 23 / 11 / 2018,

com NOTA 9,2 (nove, dois), pela Comissão Julgadora:

Prof. Titular Jarbas Caiado de Castro Neto - Orientador - FCM/IFSC/USP

Dra. Fatima Maria Mitsue Yasuoka - Pesquisadora - BR Labs Tecnologia Óptica e Fotônica

Prof. Associado Evandro Luis Linhari Rodrigues - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

AGRADECIMENTOS

A nossa família, pelo apoio e compreensão neste período de graduação.

A todos os funcionários, técnicos e secretárias que sempre estiveram dispostos a nos ajudar.

Aos nossos amigos da eletrônica 014 por todo o carinho e companheirismo durante toda a caminhada.

Aos amigos do bonde da rec (grupo de estudos), que sempre nos apoiaram nas pré provas, nos fizeram acreditar e estavam lá nos momentos difíceis desse curso.

A Jussara que sempre esteve de prontidão para nos ajudar em qualquer coisa que fosse.

Aos amigos que fizemos no LIO2A, por toda ajuda no desenvolvimento do nosso trabalho.

Aos nossos orientadores pelo apoio e orientação durante esse período.

Nosso muito obrigado!

Akina, Boné e Koji

Aos amigos do Yanagi, que sempre nos lembraram de como a vida é divertida.

Aos amigos do alojamento, que sempre nos apoiaram nas dificuldades.

Nosso muito obrigado por tudo!

Akina e Koji

Aos amigos do futeba das firmas pelos excelentes momentos de lazer e relaxamento proporcionados seja através das partidas de futebol ou pelos churrascos.

Aos amigos e amigas do grupo de respeito dos quais sem o apoio não teria conseguido entrar e nem permanecer durante todo esse tempo na universidade.

Aos amigos e amigas dos grupos bonde da jurutequila, Los muertos, Caixa forte, Botequim que não permitiram que eu desistisse.

Aos recentes amigos do Gringows pela diversão com responsabilidade e pelo apoio dado.

Boné(Fael)

Aos 'amiguinhos' do IFSC, por todo o carinho e presença mesmo após a mudança de curso.

Aos amigos que fiz ao longo de todas as extra curriculares que participei.

Ao meu namorado, minha mãe e irmã que sempre fizeram de tudo para me dar apoio e amor.

Obrigada! Sem vocês não teria conseguido!

Akina

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito de auto focalização (Kerr lensing) devido à passagem de um feixe de alta intensidade em um material com índice de refração não linear. . .	31
Figura 2 – Efeito de auto focalização (Kerr Lensing) devido a passagem de um feixe de alta intensidade em um material com índice de refração não-linear . . .	32
Figura 3 – Parâmetros do laser pulsado Ti:Safira femtossegundos e parâmetros do LIPSS.	35
Figura 4 – Representação da formação dos <i>ripples</i> por meio da incidência da luz branca sobre as grades de difração nanométricas.	36
Figura 5 – Gráfico experimental correlacionando a fluência e a taxa de ablação . .	37
Figura 6 – Ripples obtidos através do MEV a determinadas taxas de ablação . . .	37
Figura 7 – Pockels cell	39
Figura 8 – Esquemático de funcionamento da Pockels cell.	39
Figura 9 – Esquemático do funcionamento do pulse picker	40
Figura 10 – Configuração <i>single stack</i>	42
Figura 11 – Configuração <i>Push Pull</i>	44
Figura 12 – Cavity do laser com Ti:Safira femtossegundo	45
Figura 13 – Cavity do laser com Ti:Safira femtossegundo com as respectivas legendas.	47
Figura 14 – A cavity do laser dentro da caixa de acrílico.	47
Figura 15 – Cristal no suporte de cobre.	48
Figura 16 – O feixe passando pelos espelhos e cristal.	49
Figura 17 – Amostra de chapa de aço inox não polida.	51
Figura 18 – Amostra chapa de aço inox polida	52
Figura 19 – Placa de controle LMC2014 FIBER CUH v3.	54
Figura 20 – Laser evolution - Coherent.	55
Figura 21 – Laser Vitesse - Coherent.	55
Figura 22 – SDG - Coherent.	55
Figura 23 – Libra/Amplificador Regenerativo - Coherent.	56
Figura 24 – <i>Scanner - Sintec Optronics</i>	56
Figura 25 – Software EZcad - Beijing JCZ Technology.	57
Figura 26 – <i>Pulse pickerm</i> model 350	58
Figura 27 – Driver 25D.	60
Figura 28 – Contador síncrono 305.	61
Figura 29 – Gráfico de funcionamento do Contador Síncrono 305.	62
Figura 30 – Valor atingido com apenas um feixe.	63
Figura 31 – Imagem da cavity com o laser Verdi incidindo.	64

Figura 32 – Valor atingido com a união dos dois feixes.	65
Figura 33 – Imagem do espectro de comprimento de onda com o laser contínuo. . .	65
Figura 34 – Imagem do feixe de saída no modo alongado antes de transitar para o pulsado.	66
Figura 35 – Imagem do espectro capturado quando o laser atingiu o modo pulsado instável.	67
Figura 36 – Imagem do espectro capturado quando o laser atingiu o modo pulsado instável.	67
Figura 37 – Imagem do espectro no modo pulsado estável.	68
Figura 38 – Imagem do sistema fechado em funcionamento.	68
Figura 39 – Imagem da cavidade vista por cima.	69
Figura 40 – Mesa XYZ.	70
Figura 41 – Representação eixo X-Y.	71
Figura 42 – Pinos da porta DB25 da placa LMC2014 FIBER CUH v3.	71
Figura 43 – Circuito da mira para o laser LIBRA-S.	72
Figura 44 – Mira para o laser LIBRA-S.	72
Figura 45 – Valores de OFFSET para o posicionamento da mira.	73
Figura 46 – Amostra marcadas - Amostra 1.	74
Figura 47 – Escala Pixels por μm	74
Figura 48 – Imagens obtidas por meio do MEV com medidas em pixels.	74
Figura 49 – Montagem realizada para o teste do contador.	76
Figura 50 – Gerador de sinais Minipa.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Etapas de preparação da amostra	51
Tabela 2	–	Especificações do Libras-S dadas pelo fabricante	52
Tabela 3	–	Parâmetros do laser medidos experimentalmente	52
Tabela 4	–	Tabela comparativa dos tipos de cristais.	58
Tabela 5	–	Variação dos parâmetros(<i>loop</i> , espaçamento e velocidade de varredura)	73
Tabela 6	–	Periodicidade da Amostra 1	75
Tabela 7	–	Valores n_{es}	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

USP	Universidade de São Paulo
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TI:Safira	Titânio-Safira
PC	Pockels Cell
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
LIPSS	Laser-induced periodic surface structures
fs	femtossegundos
SEW	Surface eletromagnetic wave
PIPE	Pesquisa Inovativa em Pequenas Empresas
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
IFSC	Instituto de Física de São Carlos
Laser	Light amplification by stimulated emission of radiation
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NASA	National Aeronautics and Space Administration
LASIK	Laser-Assisted in Situ Keratomileusis
GVD	Group velocity dispersion

RESUMO

Neste trabalho de conclusão de curso foi proposto o desenvolvimento de um sistema de marcação a laser em metais utilizando o laser de Ti:Safira pulsado na faixa de femtossegundos (100 fs, 1GHz e potência da ordem de 700 mW), para produzir nanoestruturas periodicamente orientadas (*ripples*) na superfície, alterando as propriedades do material por radiação a laser de pulsos ultracurtos, cujo propósito é associar padrões específicos de cor ao tipo de nanoestruturas periódicas orientadas. As características do material produzidas pela interação com a radiação laser ultra curto apresentam dimensões em escalas nanoscópicas, produzindo novas propriedades ópticas associadas a obtenção de padrão de cores. A operacionalidade do laser em regime de pulso ultra curto exige a completa estabilidade da cavidade óptica do laser, condição esta que não permitiu a realização da integração com o subsistema de controle eletrônico do sistema de marcação. Devido a esse fato foi utilizado um laser femtossegundo comercial da Coherent, modelo Libra (100 fs, 800 nm, 1kHz, 1W e 1,0 mJ) para realizar a prova de conceito e o modelo de engenharia do projeto proposto. O sistema Libra foi adaptado para a execução do sistema de marcação, servindo de referência para o projeto aqui proposto. O resultado final ilustrado pelas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura confirmam a geração de nanoestruturas periódicas por meio da ação laser de femtossegundos nas superfícies de aço inox. Estes resultados foram obtidos utilizando o laser de referência Ti:Safira femtossegundos (Libra/Coherent) do Grupo de Óptica – IFSC – USP, os equipamentos de controle do laser pulsado Ti:Safira como o pulse picker e Q-switching foram cedidos pelo Grupo de Espectroscopia de Sólidos - IFSC - USP, o scanner de varredura, placa de controle e software e dispositivos fotônicos foram cedidos pela Empresa BR Labs. Este projeto faz parte de um projeto PIPE I/FAPESP executado pela empresa BR Labs Fotônica em parceria com o Grupo de Óptica/IFSC/USP.

Palavras-chave: Laser. Femtossegundo. Controle. Marcação.

ABSTRACT

In this work was proposed the development of a marking system with laser in metals using Ti:Safire, pulsed in the range of femtoseconds (100 fs, 1 GHz and power in order of 700 mW), applied to the generation of periodically oriented nanostructures (ripples) on the surface of material by altering the properties of the ultra-short radiation. The purpose is to associate standards pattern with the type of periodic oriented nanostructures. The characteristics of the material produced by the interaction with the ultra-short laser are at nanoscopic scales, producing new optical properties. The application of the laser in an ultra-short regime requires a complete stability of the optical cavity of the laser, but this condition could not reached. This is the reason why a commercial laser from Coherent, model Libra (100 fs, 800 nm, 1kHz, 1W and 1.0 mJ) was used to carry out the proof of concept and the engineering model of the proposed design. The Libra system was fully adapted for the execution of the marking system, to serve as a reference for the project proposed here. The final result of scanning electron microscopy images confirms a generation of periodic nanostructures by the action of femtoseconds laser on the stainless steel surfaces. The results were obtained using Ti:Sapphire femtoseconds laser (Libra/Coherent) of the Optics Group - IFSC - USP, the control equipment of Ti:Sapphire using pulse picker and Q-switching were granted by the Solid Spectroscopy Group Solids - IFSC - USP, the scanner, the control board and the marking software were provided by the BR Labs Company. This project is part of a project PIPE I/FAPESP executed by the company BR Labs Fotônica in partnership with the Optics Group/IFSC/USP.

Keywords: Laser. Femtosecond. Control. Marking.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	29
2.1	Laser	29
2.2	Formação dos <i>ripples</i>	34
2.3	Controle dos parâmetros do laser	38
2.3.1	<i>Pockels-cells</i>	38
2.3.2	<i>Pulse Picker</i>	40
2.3.3	Módulo de controle	41
2.3.4	Driver do <i>pulse-picker</i>	41
3	MATERIAIS E MÉTODO	45
3.1	Montagem do Laser	45
3.2	Formação dos <i>ripples</i>	50
3.3	Sistema de montagem em bancada	57
3.3.1	<i>Pulse Picker</i> model 350	58
3.3.2	Driver 25D	59
3.4	Contador síncrono 305	60
4	RESULTADOS E ANÁLISES	63
4.1	Laser de Bancada	63
4.2	Formação dos <i>ripples</i>	70
4.3	Sistema de sincronização	75
5	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas ocorreram várias inovações tecnológicas no mundo, nas mais diversas áreas como engenharia, medicina, aeronáutica, mecânica e fotônica, sendo esta última com diversos avanços no desenvolvimento de laser e suas aplicações. Nesse contexto destaca-se a utilização de lasers para cirurgias oculares, endovasculares, gastrointestinais e urologia, mapeamento aéreo, sensoriamento, perfurações, cortes, processamento de materiais, telecomunicações, espectroscopia, processamento de superfícies e especialmente na realização de marcações coloridas em metais.

A utilização de laser para marcação colorida em metais tem sido amplamente estudada principalmente pela demanda e busca nas últimas duas décadas do setor industrial por tecnologias que permitam economia financeira e a redução da geração de resíduos no processo de marcação.

A história do LASER começa com Albert Einstein, estabelecendo a existência na publicação de um artigo em 1917. Após isso, o cientista Charles H. Townes, da Universidade de Columbia realizou a amplificação de radiação estimulada nos anos 50, porém não com luz, e sim com microondas. Existe ainda alguma discórdia sobre quem merece o crédito pelo conceito do laser. Basov e Prokhorov dividiram o prêmio Nobel de Física de 1964 com Townes pelo trabalho pioneiro sobre os princípios envolvendo os masers e lasers. Schawlow também recebeu uma parte do prêmio Nobel de Física de 1971 por suas pesquisas com lasers. (ZILLIO, 2018)

Laser de Ti:Safira (Titânio e Safira) foi desenvolvido por Peter Moulton em 1986 (MOULTON, 1986) no Laboratório Lincoln do MIT. Por ser um laser de pulsos ultracurtos permite que delicadas estruturas sejam estudadas ou modificadas com um controle preciso de interação térmica, por consequência possui vasta aplicação em diversas áreas. É amplamente usado em laboratórios de pesquisa onde é necessário espectroscopia de alta resolução. A NASA mantém um projeto chamado LASE onde se faz uso de um laser de Ti:Safira para medir vapor de água, aerossol e o comportamento das nuvens (NASA,). Na medicina é usado em cirurgias oftalmológicas onde há necessidade de se cortar o *flap* da córnea nas cirurgias LASIK (DUSSER et al., 2009), cujo trabalho foi prêmio Nobel em física em 2018, para Gérard Mourou e Donna Strickland com geração de lasers supercurtos de alta intensidade.

Estudos da interação do laser com as superfícies dos materiais revelam a formação de estruturas periódicas produzidas pelo feixe de laser, quando sua energia está próxima ao limiar de dano. Em tal interação de luz intensa com os materiais, alta excitação de superfícies sólidas resulta em formação de nanoestrutura com tamanho tipicamente da

ordem do comprimento de onda, permitindo uma boa resolução espacial. Estas estruturas, que são fortemente dependentes das características do campo eletromagnético incidente, têm sido amplamente estudadas em diversos casos de irradiação a laser (DUSSER et al., 2009).

A interação de radiação laser com superfícies metálicas, quando o laser tem potência suficiente para alterar as propriedades físicas do material, revelou a formação de estruturas periódicas em escala nanométrica na superfície com dimensões ainda menores que o comprimento de onda do laser, sendo elas intensamente estudadas como se verifica nas referências citadas. Estruturas com cerca de 150 nm podem ser obtidas com boa resolução espacial utilizando um laser na faixa do infravermelho, $\lambda = 1064$ nm, durante o processo de modificação das propriedades físicas dos materiais.

Os lasers utilizados atualmente para marcações coloridas em metais são os lasers de nanossegundos e femtossegundos. Os lasers de nanossegundos geram uma camada de oxidação na superfície do materiais, que são responsáveis pelo processo de marcação em materiais. No entanto, as marcações em aço inox sofrem o efeito de corrosão ao longo do tempo, sendo assim ineficiente para a aplicação industrial. Já os lasers de femtossegundos não apresentam esse efeito, pois o processo de marcação não se dá por oxidação, e sim por geração de nanoestruturas periódicas (denominadas de *ripples*) em suas superfícies. Atualmente as marcações não possuem cor independente do ângulo de visão do observador, a fim de resolver esse problema é necessário que haja o controle completo dos parâmetros do laser de femtossegundos, tais como taxa de repetição, potência média, potência de pico, velocidade de varredura, números de repetições de varredura, variações no ângulo de polarização do feixe de incidência do laser, entre outros, para que torne possível o controle da coloração e seus níveis de contrastes. (SKOLSKI, 1985)

Cores brilhantes das nanoestruturas da superfície, especialmente para os comprimentos de onda mais longos, têm sido produzidas durante a marcação através da variação pré-determinada do ângulo de incidência do laser e da variação resultante do período da rede de difração. Esta técnica de coloração foi demonstrada para o caso do silício e vários metais para marcar superfícies em qualquer cor individual com um nível de brilho controlável e quase sem algum acompanhamento de modificação química da superfície (IONIN et al., 2012).

O estado da arte do processo de coloração de superfícies sólidas induzidas a laser femtossegundos está baseado na geração de superfícies harmônicas nanoestruturadas (*nanoripples ou nanogratings*) (IONIN et al., 2012). A variação de cor é produzida modificando o período efetivo da grade de difração resultante da nanoestrutura, que depende de sua orientação na superfície e da polarização do laser femtossegundos. No entanto, este princípio de coloração não apresenta homogeneidade em brilho, já que a eficiência da grade de difração irá variar para diferentes ângulos de difração, de modo que será necessário

neste projeto otimizar o procedimento para aumentar a eficiência de difração para a faixa da luz visível, considerando os diferentes ângulos de difração.

Este projeto se resume na produção do laser de femtossegundos de Ti:Safira (100 fs) e o controle de seus parâmetros, utilizando-o assim para realizar marcações coloridas em aço inox, além de verificar a interferência dos parâmetros do laser para a geração das nanoestruturas.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Laser

Laser, abreviação em inglês para inglês *light amplification by stimulated emission of radiation*, que consiste da amplificação da luz por emissão estimulada de radiação, que é uma radiação eletromagnética monocromática, coerente e colimada, ou seja, ela possui apenas um comprimento de onda, os feixes estão em fase e de forma paralela. Basicamente, o sistema laser amplifica a luz no interior de uma cavidade óptica, composta por um meio ativo e dois espelhos de alta refletância. Em lasers mais complexos são utilizados mais elementos para compor a cavidade, como por exemplo, etalons, cristais dobradores de frequência, espelhos de dispersão negativa entre outros.

Os modos de oscilação são gerados pelo campo elétrico dentro da cavidade de comprimento L:

$$v_n = n \frac{c}{2L} \quad (2.1)$$

onde c é a velocidade da luz e n um número inteiro. O meio ativo da cavidade e os elementos limitantes vão determinar quantos e quais modos vão oscilar. O campo elétrico resultante na saída do laser pode ser expresso como uma somatória de todos os campos oscilantes:

$$E(t) = \sum E_n(t) e^{i(2\pi v_n t + \varphi(t))} \quad (2.2)$$

Quando não há controle dos modos de oscilação da cavidade a saída do laser será instável, visto que as grandezas $E_n(t)$ e $\varphi(t)$ podem variar livremente com o tempo em função de perturbações externas a cavidade.

Existem dois tipos de lasers: contínuo e pulsado. O laser de modo contínuo tem uma banda curta de comprimento de onda e apresenta operação em regime contínua, já o laser pulsado opera em uma dada banda alargada de comprimento de onda, com repetição de pulsos em um determinado intervalo de tempo e um pulso de intervalo bem curto.

Para a geração de pulsos ultracurtos é necessário o acoplamento desses modos de forma que as fases e amplitudes sejam constantes no tempo. Como exemplo da formação de pulsos, suponhamos que as fases $\varphi(t)$ são constantes no tempo e identicamente nulas e as amplitudes $E_n(t)$ sejam também constantes e iguais a $E_0(t)$, dessa forma o campo resultante será:

$$E(t) = E_0(t) e^{i(N\omega_c t)} \left[\frac{\text{sen}\left(\frac{N\omega_c t}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\omega_c t}{2}\right)} \right] \quad (2.3)$$

onde N é o número de modos permitidos na cavidade e $\omega_c = c/2L$ é a frequência característica da cavidade. Como a intensidade é proporcional a $|E(t)|^2$, então:

$$I(t) = I_0 \left[\frac{\text{sen}\left(\frac{N\omega_c t}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\omega_c t}{2}\right)} \right]^2 \quad (2.4)$$

o que corresponde a um pulso como duração de:

$$Tp = 1/\omega_c N = 2L/cN \quad (2.5)$$

Um regime muito importante para a operação de um laser é o regime de modos travados (*mode-locking*), também conhecido como regime de fases travadas. Este tipo de operação, que permite a obtenção de pulsos extremamente curtos, ocorre ao se inserir um elemento intra cavidade que produz uma correlação entre as fases dos diversos modos longitudinais. Portanto, com o aumento do número de modos acoplados permitidos pela cavidade, é possível reduzir o tamanho temporal do pulso propagante. Deste modo pode-se concluir que quanto maior o número de modos acoplados, menor será a duração do pulso na cavidade. Porém a quantidade de modos acoplados é limitada pela largura de banda de emissão do meio ativo que exprime a largura da faixa espectral, que torna possível haver ganho e, portanto, oscilação na cavidade. (ZILLIO, 2018)

O meio ativo do laser é o cristal de safira dopado com titânio ($Al_2O_3:Ti^{+3}$), esse cristal possui características não lineares, de modo que o seu índice de refração depende da intensidade de luz em que o material é submetido. O índice de refração é descrito por:

$$n = n_o + n_2 I. \quad (2.6)$$

Para meios transparentes, o valor de n_2 é muito pequeno, da ordem de $10^{-16} cm^2/W$, de modo que o termo não linear só se manifesta para altos valores de intensidade, o que acontece em um laser pulsado. A não linearidade do índice de refração faz com que ocorra uma auto modulação de fase. Por exemplo, em um laser de pulso de 100 fs e 1 nJ de energia possui potência de pico de 10 kW. Se incidido numa área de $10 \mu m$ de raio, implicará em intensidade de aproximadamente $3 GW/cm^2$. Devido a essa não linearidade um pulso intenso propagando nesse material sofrerá uma defasagem de:

$$\varphi(t) = \omega_o t - kz = \omega_o t - \frac{\omega_o}{c} n_2 z \quad (2.7)$$

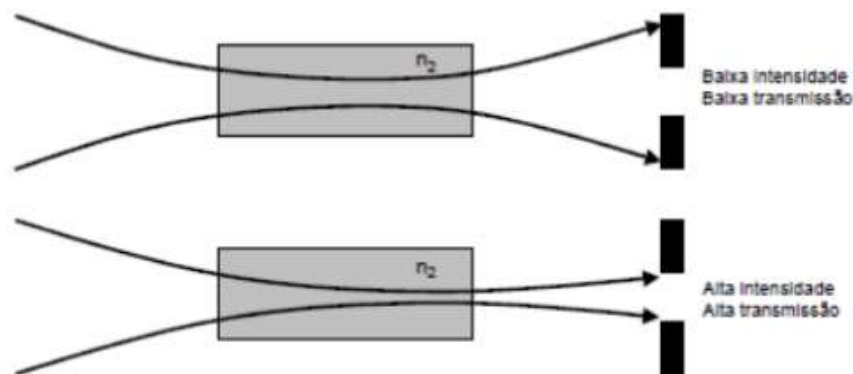
onde k é o vetor de onda e z é o comprimento de propagação. Substituindo na equação do índice de refração e derivando, tem-se:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega_o - \frac{\omega_o}{c} n_2 z \frac{I(t)}{dt}. \quad (2.8)$$

Após a propagação, o sinal sofre um desvio de frequência que depende da variação da intensidade da luz do pulso no tempo, a esse fenômeno dá-se o nome de auto modulação de fase.

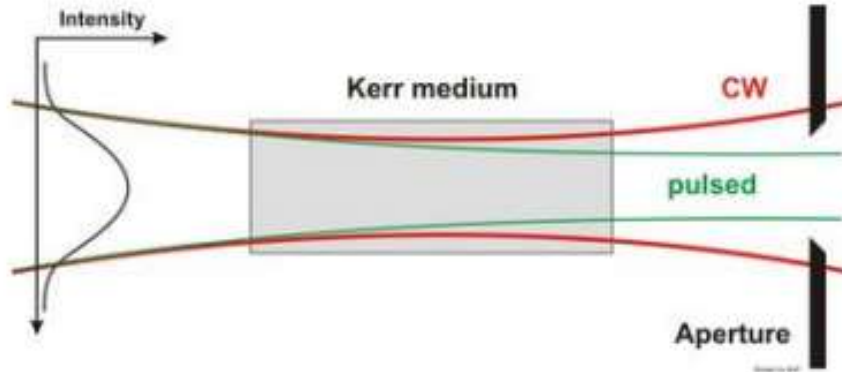
A formação de uma lente dinâmica convergente, também conhecida como lente Kerr é outra consequência do efeito não linear do cristal. A alta intensidade do pulso na região próxima ao eixo de propagação de luz induz uma lente que focaliza o feixe. Este efeito de lente induzida pelo próprio pulso faz com que o índice de refração cresça mais no eixo de propagação do que nas bordas, então a cavidade se torna instável para o pulso e será amplificado continuamente a cada volta. A figura 1 mostra o efeito da lente Kerr. Devido ao fato do meio ativo ter um certo tempo de recuperação e ser depletado após a passagem do pulso, apenas este pulso será amplificado, levando a uma situação estacionária. Outros prováveis pulsos que poderiam ser gerados não serão amplificados e, como consequência, não induzirão uma lente suficientemente forte para tornar a cavidade estável para sua propagação, e serão atenuados.

Figura 1: Efeito de auto focalização (Kerr lensing) devido à passagem de um feixe de alta intensidade em um material com índice de refração não linear.



Fonte: ([BRLABS](#),)

Figura 2: Efeito de auto focalização (Kerr Lensing) devido a passagem de um feixe de alta intensidade em um material com índice de refração não-linear



Fonte: (BRLABS,)

A cavidade do laser sendo montada com óptica apropriada para lasers de femtossegundos e alinhada de modo a alcançar-se a maior potência possível em regime contínuo, obter-se-á a transição para o regime pulsado apenas aproximando um dos espelhos curvos do cristal, segundo os especialistas, tornando a cavidade instável para regime contínuo e estável para regime pulsado, devido ao surgimento dessas duas novas propriedades. Além disso, devido ao fato do meio ativo ter um certo tempo de recuperação e ser depletado após a passagem do pulso, apenas este será amplificado, levando a uma situação estacionária. Outros prováveis pulsos que poderiam ser gerados não serão amplificados e, como consequência, não induzirão uma lente suficientemente forte para tornar a cavidade estável para sua propagação, e serão atenuados.

Para que a luz com uma polarização em particular seja totalmente transmitida é necessário que o cristal tenha um corte em sua superfície obedecendo ao ângulo de Brewster, que no caso do Ti:Safira é $60,4^\circ$ com a normal, determinada pela seguinte fórmula:

$$\operatorname{tg}(\theta_{\text{Brewster}}) = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.9)$$

onde $n_2 = 1,714$ é o índice de refração do cristal e o n_1 é o ar.

Ângulo de Brewster ou ângulo de polarização é o ângulo de incidência para o qual a reflexão anula completamente a componente paralela da onda em relação ao plano de incidência. Com isso, a onda refletida só tem uma componente, que é a perpendicular ao plano de incidência. O ângulo no qual este fenômeno ocorre é assim denominado devido ao físico escocês, Sir David Brewster (1781–1868).

Qualquer elemento intra-cavidade colocado em ângulo gera astigmatismo, o laser de Ti:safira possui duas fontes de astigmatismo que são os espelhos curvos e o próprio cristal.

Para um laser contínuo, a não compensação do astigmatismo introduzido pelo cristal gera um feixe com perfil elíptico em vez de circular, que pode causar perda de potência. Para o laser pulsado essa não compensação pode mudar o formato do feixe e inibir o início do regime pulsado. Em uma cavidade composta apenas por espelhos e cristal, o astigmatismo pode ser compensado ajustando o ângulo dos espelhos curvos.

Um importante fator é a dispersão de velocidade de grupo (group velocity dispersion – GVD) da cavidade, que é uma característica de qualquer meio dispersivo, que promove contínuos alargamento e atenuação de pulsos, não contribuindo para a estabilidade de regime pulsado. Formalmente, a GVD é definida como a derivada do inverso da velocidade de grupo da luz em um material com relação à frequência angular, ou seja,

$$GVD(\omega_o) \equiv \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{1}{V_g(\omega)} \right) \quad (2.10)$$

Onde ω e ω_0 são frequências angulares e a velocidade do grupo $V_g(\omega)$ é definido como $V_g(\omega) = \frac{\partial \omega}{\partial k}$. As unidades de dispersão de velocidade de grupos são $\frac{[tempo]^2}{[distância]}$, frequentemente expressas em fs^2/mm . (BOYD, 2007)

Para resolver este problema, existem os chamados espelhos *chirped*, que compensam a dispersão de velocidade das várias frequências óticas oscilantes na cavidade. São espelhos dielétricos, com espaços de profundidade variável projetados para refletir comprimentos de ondas variáveis entre as camadas dielétricas.

Um espelho dielétrico comum é feito para refletir uma única frequência de luz. O espelho dielétrico é feito de materiais transparentes que são uniformemente sobrepostos a uma profundidade de 1/4 do comprimento de onda da luz, conforme o modo que o espelho dielétrico é projetado para refletir. O espelho dielétrico é transparente para outros comprimentos de onda de luz, exceto aqueles em uma faixa muito estreita em torno do comprimento de onda que é projetado para refletir, ou seja, o espelho *chirped* é feito com várias camadas com diferentes profundidades. O resultado é um espelho que pode refletir toda uma determinada faixa de comprimentos de onda de luz em fase (CALEB; Ariel, 2016). Isso é possível pois as camadas mais profundas do espelho são feitas para comprimento de ondas as quais devem percorrer uma maior distância que a luz que reflete nas camadas superiores, assim, sendo projetado para alterar os tempos relativos das frentes de onda de diferentes comprimento de onda refletidos a partir dele.

Os revestimentos destes espelhos são depositados na superfície usando IBS (ion beam sputtering). Essa técnica altamente repetível e controlável resulta em revestimentos duráveis de filme fino com altos limiares de danos.

O laser Ti:Safira pulsado em desenvolvimento é da ordem de centenas de femtossegundos (fs) bombeado por um laser de estado sólido bombeado por diodo (DPSS) em 532 nm. O sistema deve operar na faixa 10 a 150 fs, com taxa de repetição de 0 a 10 KHz, no comprimento de onda de 800 nm, faixa de potência entre 25 a 100 mW, e fluência entre 0,1 a 2,0 J/cm².

O cristal utilizado na cavidade é de Safira dopado com Titânio alimentado por um laser de bombeio 532 nm Finesse da Laser Quantum (laser DPSS Nd:YAG). Um dos grandes motivos da popularidade do laser de Ti:Safira vem do fato do seu meio ativo, o cristal de safira (Al₂O₃) dopado com íons de titânio, permitir a sintonia do comprimento de onda de emissão do laser através de um largo espectro (650 a 1100 nm), e com a variação de algumas características de sua cavidade pode-se obter pulsos de duração desde centenas de picossegundos até centenas e atossegundos.

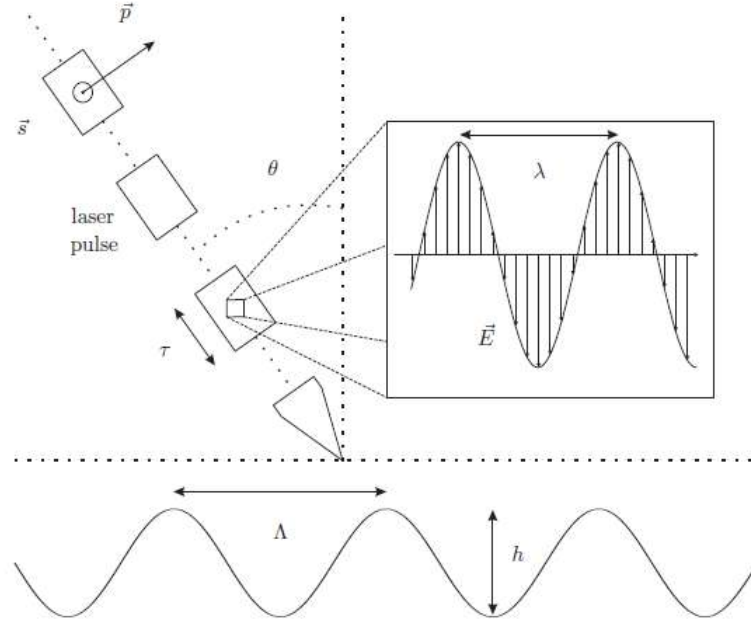
Sumarizando, para a realização de gravação em metal gerando as nanoestruturas, precisa-se de um laser em femtossegundos, o que deve ser feito a partir de um cristal de Ti:Safira, que é cortado no ângulo de brewster, gerando um feixe pulsado através de um conjunto de espelhos chirped, para eliminar os efeitos GDV.

2.2 Formação dos *ripples*

Os *ripples* são nanoestruturas periódicas criadas na superfície dos metais, sua formação ainda é uma questão em estudo, pois não se tem até o momento uma explicação completa, porém os estudos mais avançados e comumente aceitos são de que essas nanoestruturas são formadas pela interação da luz do laser incidente na superfície do material, modificando a estrutura eletrônica na superfície do material. A observação do efeito das nanoestruturas geradas ocorre devido à interferência da luz incidente refratada com a luz espalhada perto da interface. Esse espalhamento ocorre devido as superfícies não serem totalmente lisas e uniformes, possuindo rugosidades em escala nano ou microscópicas devido a variações na constante dielétrica do material.

A marcação colorida utilizando laser é o resultado da geração destes *ripples*, também conhecido como LIPSS(em português, estruturas de superfície periódicas induzidas por laser), sua periodicidade é próxima ao comprimento de onda do laser, como observado na figura 3, e sua direção é ortogonal a direção de polarização do laser. Atualmente há vasta gama de artigos e experimentos publicados sobre LIPSS, no entanto a influência dos parâmetros do laser na formação dos *ripples* e conseqüentemente na cor não estão completamente definidos, pois suas equações foram obtidas empiricamente, equações essas que tem se mostrado bastante confiáveis.

Figura 3: Parâmetros do laser pulsado TI:Safira femtossegundos e parâmetros do LIPSS.



Fonte: (SAKABE et al., 2009)

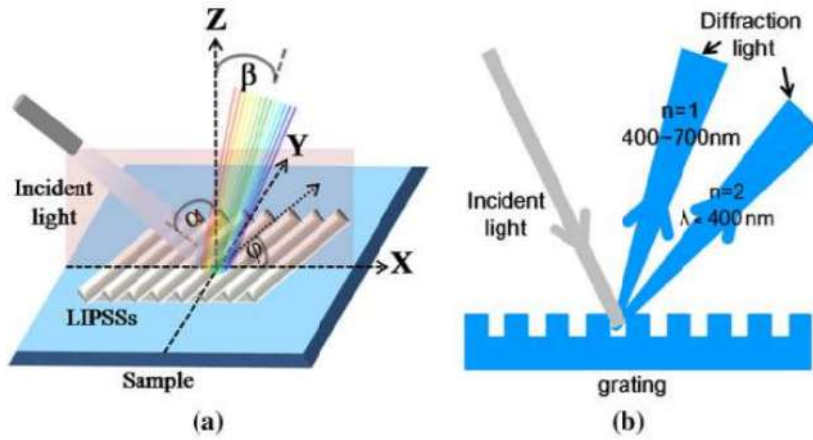
Na figura 3, θ é o ângulo de incidência do laser com a normal do material, λ o comprimento de onda do laser, h a profundidade dos *ripples*, Λ a periodicidade dos *ripples*, τ a duração do pulso, \vec{E} o campo elétrico, \vec{p} a componente do feixe de laser com polarização paralela do feixe no plano de incidência, e \vec{s} a componente do feixe do laser com polarização ortogonal ao plano de incidência.

Os parâmetros mencionados possuem importância significativa na formação dos *ripples*, principalmente a periodicidade dos *ripples*, que é a responsável direta pela cor vista pelo observador conforme indica a equação 2.11.

$$n\lambda = \Lambda(\sin\alpha \cdot \sin\varphi + \sin\beta). \quad (2.11)$$

Onde n é a ordem de difração, λ o comprimento de onda visto, Λ a periodicidade dos *ripples*, α o ângulo de incidência do laser, φ a orientação dos *ripples* em relação ao eixo x e β o ângulo de luz difratada, ou seja, o ângulo do observador em relação ao eixo Z , conforme representado na figura 4.

Figura 4: Representação da formação dos *ripples* por meio da incidência da luz branca sobre as grades de difração nanométricas.



Fonte: (SOUZA; Yasuoka, 2017)

A periodicidade dos *ripples* tem uma participação fundamental na produção da cor observada. Através da equação 2.12 pode-se verificar os parâmetros que influenciam a periodicidade dos *ripples*.

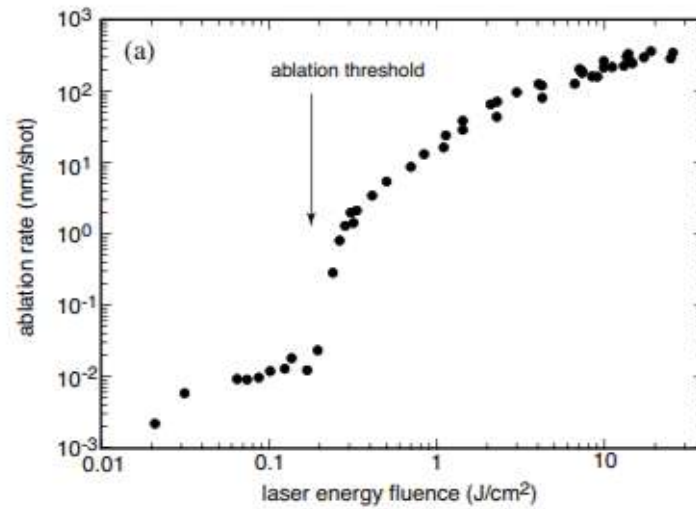
$$\Lambda = \lambda_L \left\{ 1 + \left(\frac{n_{es} e^2 \lambda_L^2}{m c^2} - 2 \right)^{-1} \right\}^{-1/2} \quad (2.12)$$

Onde n_{es} é densidade de elétron na superfície induzida pelo laser incidente, e é a carga do elétron, m é a massa do elétron, c é a velocidade da luz no vácuo e λ_L é o comprimento de onda do laser incidente.

Através da equação 2.12 e dos parâmetros que a compõem, sabe-se que a massa do elétron, a carga do elétron e a velocidade da luz no vácuo são componentes constantes, sendo assim somente a alteração do comprimento de onda ou da densidade de elétron, que se caracteriza pela interação de pulsos do laser com o plasma de superfície produzido pelo laser, modificam a periodicidade dos *ripples*.

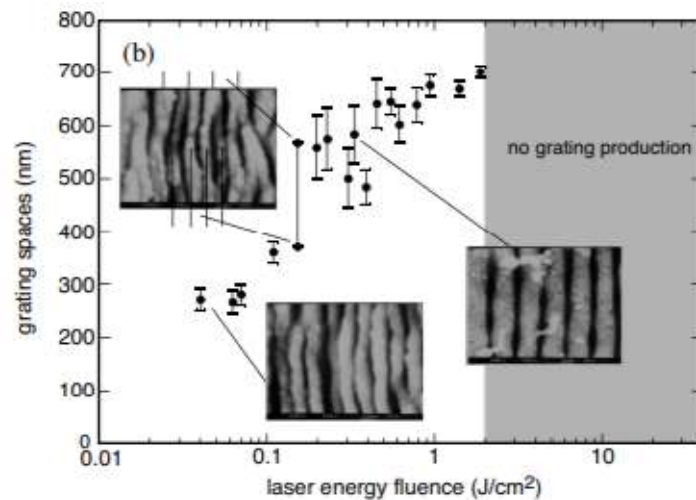
Os vales dos *ripples* são produzidos por ablação, as taxas de ablação são estimadas a partir da profundidade dos vales produzidos por ablação em conformidade com os perfis de intensidade do laser (SKOLSKI, 2014) (SOUZA; Yasuoka, 2017). Na figura 5 e 6 observa-se a relação obtida experimentalmente por (SAKABE et al., 2009).

Figura 5: Gráfico experimental correlacionando a fluência e a taxa de ablação



Fonte: (SAKABE et al., 2009)

Figura 6: Ripples obtidos através do MEV a determinadas taxas de ablação



Fonte: (SAKABE et al., 2009)

A figura 5 indica a relação da taxa de ablação e consequentemente a produção de *ripples* com relação à fluência, além de informar um valor importante não mencionado até o momento, o limiar de ablação. Na figura 6 verifica-se que a potência após atingir o limiar de ablação, ocorre que a alta intensidade de fluência faz os *ripples* começarem a serem desmanchados, ou seja, os *ripples* são "ablacionados" entre si fazendo com que as nanoestruturas periódicas se tornem estruturas aleatórias e não periódicas.

A densidade de elétron é caracterizada pela a interação de pulsos do laser com o

plasma de superfície produzido pelo laser, que pode ser calculada pela equação 2.13.

$$n_{es} = \frac{m\omega^2}{4\pi e^2}. \quad (2.13)$$

Onde m é a massa do elétron, c a velocidade da luz no vácuo, e a carga do elétron e ω a frequência angular da dispersão do plasma com a incidência do laser, que é obtida pela equação 2.14.

$$\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2. \quad (2.14)$$

Onde ω_p é a frequência do plasma, k é o número de onda eletromagnética. (LI et al., 2014)

A atuação da fluência sobre o plasma influencia a densidade de elétron, que por sua vez altera a periodicidade, conforme a equação 2.12. Tem-se que dois parâmetros do laser influenciam diretamente a formação dos ripples e sua periodicidade: o comprimento de onda e a fluência, f_{lc} , essa dada pela equação 2.15.

$$f_{lc} = \frac{E_{pulse}}{\pi r_{feixe}^2}. \quad (2.15)$$

2.3 Controle dos parâmetros do laser

Como descrito, é fundamental o controle de alguns parâmetros do laser, em especial a taxa de repetição que pode ser controlada através de componentes óptico-eletrônicos. O principal componente utilizado para a realização desse tipo de controle são as *pockels-cells* (PC), que necessitam de uma alta tensão elétrica para funcionar e uma eletrônica de resposta rápida. Para atingir tais requisitos é necessário um driver para atingir as tensões requeridas e um sistema de controle em malha fechada, que sincronize os pulsos do laser com as PC.

2.3.1 Pockels-cells

A PC é um equipamento que consiste em um cristal opto-eletrônico (com alguns eletrodos anexados a ele) no qual a luz pode ser propagada. O atraso de fase da luz gerado pelo cristal pode ser modulado aplicando-se uma tensão elétrica, portanto as PC agem como polarizadores controlados por tensão, atuando de modo simplista como uma chave opto-eletrônica (ENCYCLOPEDIA, 2018).

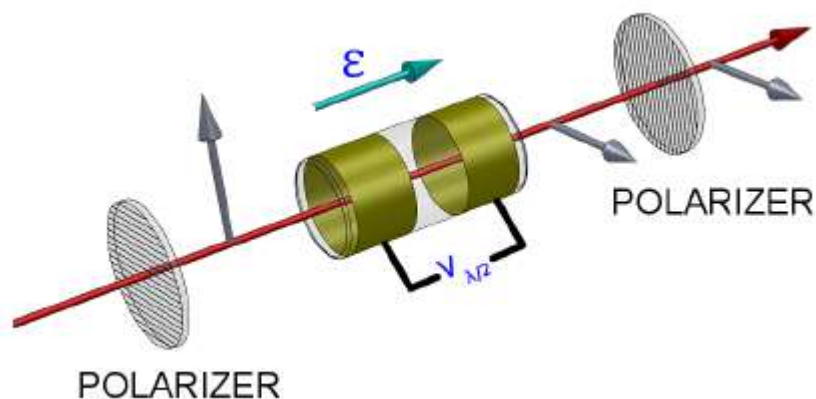
Figura 7: Pockels cell



Fonte: ([ENCYCLOPEDIA](#), 2018)

A principal propriedade das PCs é o efeito Pockels. O efeito Pockels é conhecido desde 1893, creditado ao físico alemão Friedrich Carl Alwin Pockels. O fenômeno descrito por Friedrich demonstra que o índice refrativo de um meio é proporcional à força do campo elétrico aplicado, dessa forma é possível se alterar a polarização de um feixe de luz que atravessa o cristal da PC, modulando os pulsos de luz de acordo com a tensão elétrica aplicada. O efeito Pockels é linearmente dependente do campo elétrico aplicado. A figura 8 ilustra o funcionamento de uma PC, na qual é possível observar que a luz entra polarizada em uma direção, e ao final da PC a sua polarização é alterada.

Figura 8: Esquemático de funcionamento da Pockels cell.



Fonte: ([WOOLSTON](#), 2012)

O tempo de resposta de uma PC é rápido na ordem de alguns nanossegundos ou até menos, dessa forma o tempo de resposta depende essencialmente do quão rápido e uniforme é possível se gerar o campo elétrico, ou seja, o tempo de resposta depende do driver.(WOOLSTON, 2012)

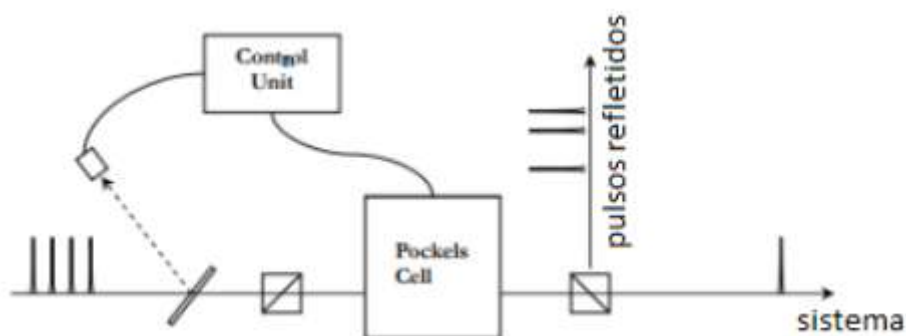
Para o sistema de controle a tensão elétrica aplicada é o suficiente para que a luz do laser seja polarizada em $\lambda/4$. Existem equipamentos que utilizam as PC em conjunto com polarizadores de filme em placas para criar um mecanismo de modulação dos pulsos, esses equipamentos são os *pulse-pickers* que selecionam os pulsos de um laser e descartam os outros, dessa forma é possível o controle da taxa de repetição.

2.3.2 Pulse Picker

O *pulse picker* é utilizado para selecionar apenas um único pulso óptico de uma sequência de pulsos de um laser de picossegundos ou femtossegundos. A operação do *pulse-picker* é baseado na PC mencionada anteriormente, ele é posicionado entre dois polarizadores como indicado na figura 9. A seguir é descrito o seu modo de operação padrão:

- O trem de pulsos é direcionada para a entrada do pulse picker.
- O pulso passa pelo polarizador de $\lambda/4$, polarizando uma vez a luz.
- A PC está ligada polarizando de $\lambda/4$, dessa forma a polarização anterior é anulada
- Então, o pulso passa pelo segundo polarizador de $\lambda/4$, continuando para o resto do sistema.
- Com a PC desligada, o pulso é polarizado pelo primeiro polarizador e no segundo ocorre a sua reflexão, dessa forma o pulso não continua para o sistema.

Figura 9: Esquemático do funcionamento do pulse picker



Fonte: Adaptado de (PROJECT,)

Dessa forma é possível a modulação dos pulsos do laser através da tensão aplicada ao *pulse-picker*, entretanto também é necessário uma fonte de alta velocidade, que seja estável o suficiente para manter a tensão elevada durante a operação do *pulse-picker*, e um sistema de controle em malha fechada para sincronizar todos os componentes eletrônicos.

2.3.3 Módulo de controle

A saída do laser pulsado possui estabilidade temporal, ou seja, a frequência dos pulsos não se altera ao longo do tempo, entretanto por ser um pulso extremamente rápido, não é possível o controle imediato dos pulsos do laser, então se utiliza a frequência dos pulsos como base e um sinal atrasado é gerado, o sinal atrasado irá coincidir após alguns períodos com um dos pulsos do laser. Através dessa coincidência é realizado o controle da taxa de repetição do laser.

Existem diversos módulos de controle comerciais disponíveis atualmente, o sistema LIBRA por exemplo utiliza o SDG (synchronization and delay generator), enquanto que o sistema da Conoptics utiliza o modelo 305. Entretanto ambos os modelos operam sob a mesma lógica de funcionamento.

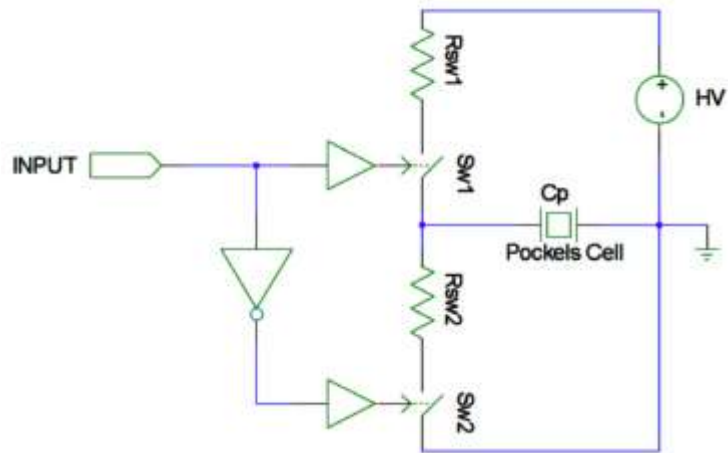
Os módulos de controle devem ser capazes de enviar pulsos de trigger sincronizados ao driver que irá acionar as PC do *pulse-picker* no período selecionado. A sincronização ocorre devido a um foto-diodo de rápida resposta instalado após um espelho do tipo *beam splitter* que faz a leitura dos pulsos do laser de entrada. A partir da frequência com que o foto-diodo é ativado e com os parâmetros de entrada do usuário, o sistema gera pulsos atrasados que coincidem com os pulsos após um determinado período de tempo. Dessa forma também é necessário levar em consideração o tempo de ativação do *pulse-picker* e do driver, assim é possível a realização do controle da taxa de repetição do laser. Nesses sistemas também é utilizada uma PLL (Phase Locked Loop) para sincronizar as fases de entrada e saída, com a PLL o sinal de ativação da PC pode ser sincronizado com o de entrada do foto-diodo ([CONOPTICS](#), b).

A PLL é uma malha de captura de fase, onde um sinal de referência é utilizado para se comparar a fase entre esse sinal e um sinal externo, então o sistema trabalha para manter ambas as fases iguais. No sistema de sincronização a PLL atua para os casos em que o laser variar a sua fase ao longo da operação, dessa forma o sistema não irá dessincronizar. Por fim o sinal do módulo de sincronização é enviado a um driver de alta tensão que ativa as PC presentes no *pulse-picker*.

2.3.4 Driver do *pulse-picker*

O acionamento da PC necessita de uma fonte de alta tensão rápida e precisa, para que a PC possa ser devidamente polarizada no tempo correto. A PC por construção apresenta um dielétrico cristalino e um eletrodo em cada extremidade, dessa forma ele

rápida. Entretanto é necessário um circuito de isolamento entre a entrada e as chaves, também é de importância que as chaves possam ser comutadas rapidamente.([WOOLSTON, 2012](#)) A velocidade de chaveamento é importante uma vez que caso ela seja baixa, muitos pulsos do laser irão ser transmitidos ou bloqueados indevidamente, dessa forma o controle não será preciso e pode ocorrer o dessincronismo do sistema de controle.

Figura 11: Configuração *Push Pull*

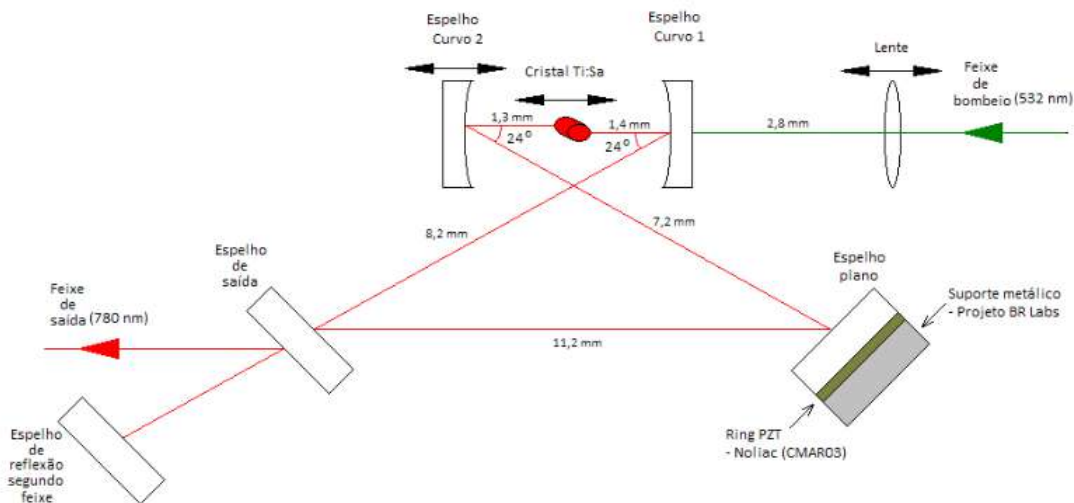
Fonte: (WOOLSTON, 2012)

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 Montagem do Laser

Para este projeto, a cavidade do laser escolhido foi o tipo bow tie, como mostra na imagem 12:

Figura 12: Cavidade do laser com Ti:Safira femtossegundo



Fonte: Documento interno BR Labs

Com os seguintes componentes:

- Lente de bombeio: dubleto (NBK7/SF2) utilizado para a focalização do feixe de bombeio DPSS laser em 532nm (Verdi/Coherent ou Finesse/LaserQuantum);
- Espelhos curvos: espelhos de sílica fundida com diâmetro de 12.7mm, S1 plano com anti-reflexo para $480-570\text{nm} < 0,25\%$ e superfície S2 de raio de curvatura de 30mm com alta refletância para $630-980\text{nm} > 99,7\%$ e refletância para $515-545\text{nm} < 10\%$. Tipo de espelhos chiperd, com GDD (Group Delay Dispersion) para 700-1020nm com aproximadamente $70(\pm 30)\text{fs}^2$;
- Espelho plano: apresenta as mesmas características nas superfícies interna e externa dos espelhos curvos;
- Espelho de saída: espelho plano de sílica fundida com anti-reflexo para $660-920\text{nm} < 0,35\%$ na superfície interna e na superfície de saída refletividade parcial para $660-920\text{nm} = 98(\pm 0,5\%)$. Possui $|GDD| < 50\text{fs}^2$, que irá garantir que seja mantida a potência de pulso;

- Espelho plano: espelho de sílica fundida com filme de prata, diâmetro de 12,7 mm, reflectância média $>97.5\%$ para 450nm - $2\mu\text{m}$ e damage threshold de $3\text{J}/\text{cm}^2$ no regime pulsado (10ns).

A configuração da cavidade conforme apresentado pela Figura 12 deverá atingir 1,0 W de potência de saída em regime contínuo para uma potência de bombeio de 5 W a 532 nm. Em regime pulsado o laser Ti:Safira femtossegundo deverá atingir 1 GHz, cuja potência de saída deve estar em torno de 900 mW.

A referência (DUSSER et al., 2009) indica a configuração do laser Ti:Safira femtossegundo capaz de produzir os *ripples* e gerar a marcação e gravação colorida:

- 150 fs;
- Comprimento de onda em 800 nm
- Taxa de repetição de 5 kHz
- Potência entre 25 - 100 mW
- Fluência de $0,2\text{ J}/\text{cm}^2$ a $2,0\text{ J}/\text{cm}^2$

Para a montagem do laser foram seguidos os passos descritos no manual de montagem da empresa BR Labs (BRLABS, 2011).

O Laser de Ti:Safira femtossegundos é composto por uma base de alumínio anodizada sobre a qual está construída toda a cavidade do laser e delimitada por uma caixa de acrílico. A caixa de acrílico é totalmente removível. No processo de instalação e alinhamento inicial é aconselhável remover as laterais, onde se encontram o orifício para entrada do feixe de bombeio e o de saída do feixe do laser.

As legendas da figura 13 encontra-se a seguir:

- OC= Output Coupler
- C= Cristal
- LC= Espelho curvo
- LB= Lente de bombeio
- LP= Espelho plano

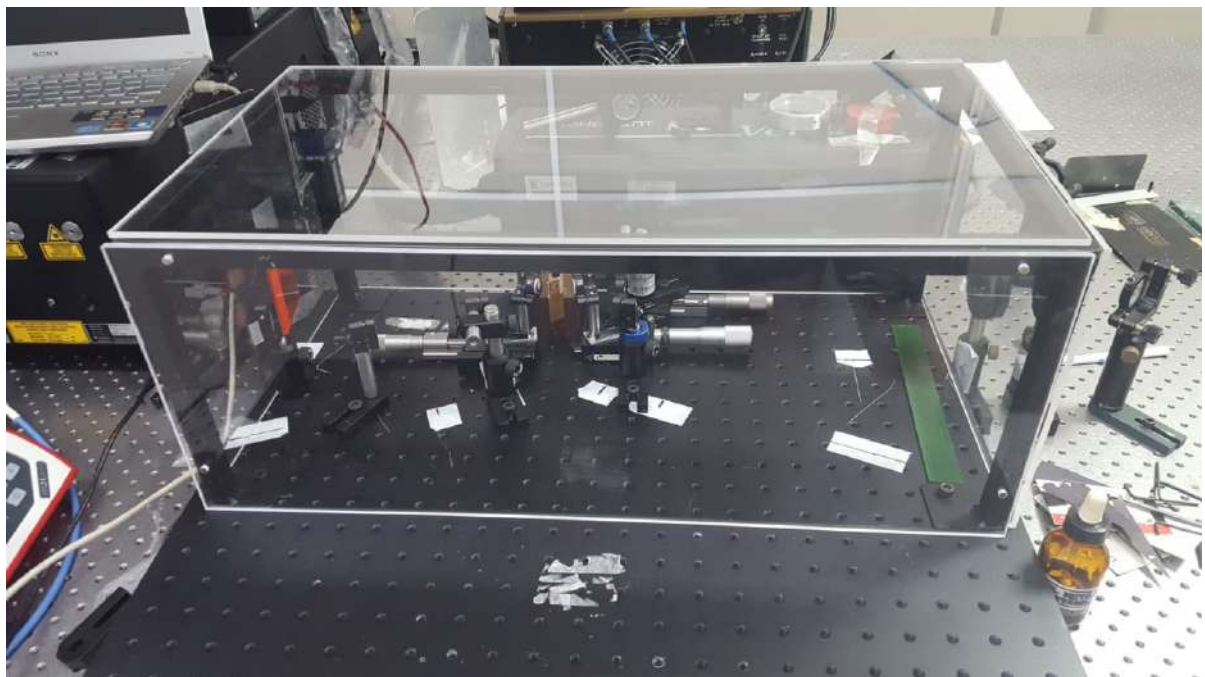
O laser possui cavidade onde o feixe infravermelho é amplificado, e é formada por dois espelhos curvos altamente refletivos, 3 espelhos planos, uma lente de bombeio e um

Figura 13: Cavidade do laser com Ti:Safira femtossegundo com as respectivas legendas.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 14: A cavidade do laser dentro da caixa de acrílico.



Fonte: Elaborado pelo autor

crystal de Ti:Safira. O cristal de Ti:Safira é sustentado em um suporte de cobre para dissipar o calor.

Os espelhos curvos e a lente de bombeio estão em estágio de translação linear para otimizar a potência e migrar para regime de modos travados. É importante também que o laser de bombeio não tenha flutuações significativas em potência, além de incidir com polaridade horizontal sobre o cristal Ti:Safira e ser o mais paralelo possível à superfície da mesa. O Laser de Ti:Safira femtossegundos deve ser instalado sobre a mesma mesa que se

Figura 15: Cristal no suporte de cobre.



Fonte: Elaborado pelo autor

encontra o laser de bombeio. Essa mesa deve ser plana e rígida.

Os procedimentos para a produção do laser estão a seguir:

Primeiramente, o cristal deve ser posto em um suporte de cobre, com seu corte em ângulo de Brewster, que é de $60,4^\circ$ como mostra a figura 15.

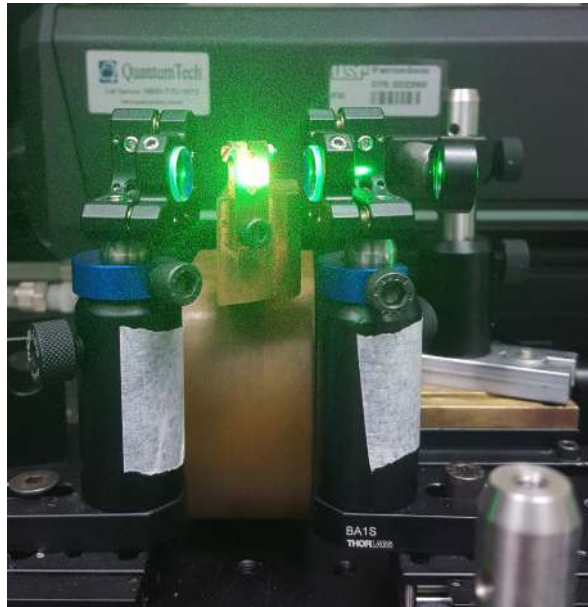
O feixe do laser Verdi deve passar bem ao centro do cristal com polaridade horizontal, e a reflectância dele deve ser mínima, para isso, girou-se o suporte para que encontrasse o ângulo de Brewster. Após isso, colocou-se a lente de bombeio em um transladador a 5 cm do cristal aproximadamente.

Em seguida, os espelhos curvos foram colocados em seus respectivos lugares: ambos a 1,5 cm do cristal, com a parte côncava faceando o cristal e em um transladador. Esses espelhos não ficarão perpendiculares em relação a direção do feixe do laser verdi, pois eles devem corrigir o astigmatismo do sistema, portanto, vão estar a 24° com relação ao feixe do laser. Durante todo o processo deve-se observar a altura do feixe do laser Verdi, que deve ser a mesma em todo o seu percurso.

Os feixes saindo dos espelhos curvos devem estar propagando paralelamente, ou seja, os feixes devem manter um mesmo tamanho de *spot* ao longo do seu caminho, para isso, deve se encontrar o melhor ponto ajustando o transladador.

Instalou-se então o espelho *chirped* plano (P1) com as distâncias indicadas na figura 12 e em seguida instalou-se o espelho plano (P2) também com as distâncias indicadas na mesma imagem. Após isso, realizou-se o alinhamento dos feixes dentro da cavidade, para

Figura 16: O feixe passando pelos espelhos e cristal.



Fonte: Elaborado pelo autor

isso existem duas formas:

- Fazer com que os feixes voltem ao espelho curvo. Isso pode ser verificado através de um pequeno furo em um papel, o feixe deve entrar e voltar por ele. Assim que ambos estejam realizando este percurso, fazer com que os espelhos planos direcionem os feixes um para o outro.
- Fazer com que os feixes incidam no outro espelho plano e voltem para o próprio espelho no mesmo ponto, isso pode ser verificado através de óculos de proteção que bloqueiem a faixa de 532 nm.

Neste ponto, atrás do P2, com o auxílio de um óculos de proteção da faixa de 532 nm e um anteparo branco, deve-se enxergar dois *spots* vermelhos, que são a fluorescência do cristal de Ti:Safira. Visualmente, consegue-se verificar que esses 2 *spots* próximos são 2 feixes dos dois sentidos de propagação dentro da cavidade, isso deve se sobrepor com alinhamento da cavidade.

Com um auxílio de um medidor de baixas potências, foi feito o alinhamento da cavidade, alterando o posicionamento da lente de bombeio e os dois espelhos curvos, alterando o posicionamento vertical e horizontal dos dois espelhos curvos e dois espelhos planos, sempre verificando o aumento ou diminuição da potência do feixe. A ação laser no feixe de saída laser ocorre quando atinge a potência na ordem de mW.

Atingido cerca de 50 mW, deve-se trocar o medidor de potência para a Potência a Laser Manual Digital e Console do Medidor de Energia da *Thorlabs*. Percebendo que não tem grandes alterações na potência de saída, foi realizado o procedimento de *walk-off*, que é deslocar o espelho curvo C2 para que caia para a metade da potência e tentar recuperar a potência original corrigindo com o espelho plano P2. O mesmo serve para o conjunto de espelho curvo C2 e espelho plano P1.

Quando atingir aproximadamente 500 mW, coloca-se o espelho plano de reflexão do segundo feixe, atrás do feixe à esquerda, para sobrepor os feixes, assim, atingindo 1 W de potência na saída da cavidade.

Após atingir 1 W do laser infravermelho no regime de laser contínuo, precisa transitar para o regime de modo pulsado. Isso significa que ele entrará em *mode locking* e precisaria encontrar o melhor ponto para aproveitar os efeitos da não linearidade do cristal, como o efeito Kerr.

Para isso, utilizou-se o espectrômetro Ocean Optics USB 2000+ para observar o espectro de comprimento de onda, onde pôde-se verificar que em modo contínuo existem picos em diversos comprimentos de onda. O procedimento é tal que deve-se aproximar o espelho curvo C2, até que o feixe de saída se alongue verticalmente. Neste momento, afasta-se delicadamente o espelho até que observa-se o "piscar" do spot.

Uma vez encontrada essa posição, são feitos ajustes finos em um par de espelhos planos, monitorando sempre a potência do laser, e realizou a obtenção do regime de modos travados bloqueando e liberando o feixe dentro da cavidade usando um anteparo.

O laser atingiu o modo pulsado quando no espectrômetro observou um espectro largo entre 750 nm e 1000 nm.

3.2 Formação dos *ripples*

O estudo da formação dos *ripples* inicia-se por meio da preparação das amostras para marcação, o material escolhido a ser empregado para o desenvolvimento desse estudo é o aço inoxidável, devido à suas propriedades mecânicas, físicas e metalúrgicas. Devido a essas propriedades juntamente com a sua versatilidade, facilidade de limpeza, esterilização resistência a altas temperaturas e resistência a corrosão em vários meios, sua aplicação é vasta, assim como em instrumentos cirúrgicos e nesse estudo, como superfície para marcações. Na figura 17 tem-se uma imagem das amostras utilizadas sem marcação.

Conforme pode-se observar na figura 17 a chapa de aço inox possui uma grande quantidade de riscos e resíduos indesejáveis, pois tais elementos na amostra podem comprometer a qualidade da marcação e seu resultado final, sendo assim para se obter uma amostra mais uniforme realiza-se um processo de lixamento e polimento, seguindo as etapas conforme indicado na tabela 1.

Figura 17: Amostra de chapa de aço inox não polida.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 1: Etapas de preparação da amostra

Etapa	Material utilizado	Descrição
1	Lixa 400	Realiza-se um lixamento buscando uniformizar a superfície da amostra em movimentos uniforme, contínuos e linear entre uma borda e o seu lado paralelo.
2	Lixa 600	Realiza-se um lixamento buscando uniformizar a superfície da amostra em movimentos uniforme, contínuos e linear entre uma borda e o seu lado paralelo.
3	Lixa 1200	Realiza-se um lixamento buscando uniformizar a superfície da amostra em movimentos uniforme, contínuos e linear entre uma borda e o seu lado paralelo.
4	Lixa 2000	Realiza-se um lixamento buscando uniformizar a superfície da amostra em movimentos uniforme, contínuos e linear entre uma borda e o seu lado paralelo.
5	pasta de diamante	Coloca-se uma pequena quantidade de pasta de diamante na amostra e a leva para a lixadeira e realiza-se assim o polimento.

Após a realização das etapas de preparação descritos na tabela 1 a amostra fica bem uniforme e espelhada, conforme indica a figura 18, característica essa que permite uma melhor visualização das marcações.

Com as amostra preparadas e devidamente polidas para a realização do estudo da formação dos *ripples* e a validação da teoria sobre o tema proposto, utilizou-se o laser femtossegundo comercial da Coherent Modelo Libra-S, com as seguintes especificações indicadas pelo fabricante descritas na tabela 2:

Figura 18: Amostra chapa de aço inox polida



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2: Especificações do Libras-S dadas pelo fabricante

Taxa de repetição	1kHz
Largura de pulso	100 fs
Potência média	1 Watt
Energia por pulso	1 mJ
Faixa de comprimento de onda	780-820 nm

Para uma análise minuciosa da formação dos *ripples*, realizou-se a medida dos parâmetros indicados pelo fabricante em laboratório, os resultados obtidos encontram-se na tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros do laser medidos experimentalmente

Taxa de repetição	1 kHz
Largura de pulso	81 fs
Potência média	0..7 Watt
Energia por pulso	0.7 mJ
Faixa de comprimento de onda	802 nm

É importante mencionar que os parâmetros obtidos são da saída do sistema laser LIBRA-S, no entanto, este sistema não é apenas um laser unitário, mas um conjunto de dispositivos, que quando conectados e sincronizados fornecem os parâmetros indicados na tabela 3. O conjunto de dispositivos e suas respectivas funções estão descritas abaixo.

1. Laser Vitesse

Laser de estado sólido Ti:safira

Taxa de repetição: 80 MHz, Potência: 282 mW, Comprimento de onda: 802nm.

O laser Vitesse, nesse sistema denominado laser semente, tem como função gerar os pulsos em fs, pulsos esses de baixa potência e alta frequência.

2. Laser Evolution

Laser de bombeio pulsado de Nd:YLF

Taxa de repetição: 1 kHz, Potência: 12 W, Comprimento de onda: 527 nm.

Tem como função fornecer energia para o amplificador regenerativo de modo que essa energia seja utilizada para a amplificação dos pulsos do laser semente.

3. SDG

Gerador de sinais de sincronização

Excursionamento máximo dos *delays*: *Delay* 1 - 140 a 170 nanossegundos, *Delay* 2 - 280 a 340 nanossegundos.

É um sistema composto por sensores e lógica de sincronização que permitam que o laser de bombeio seja utilizado no momento exato o qual o laser semente está circulando pelo amplificador, de modo que a amplificação seja efetuada com sucesso.

4. Chiller

Sistema de refrigeração à água deionizada

Temperatura de funcionamento para o Libra-S: 22°

A sua função é garantir a refrigeração do sistema em temperatura adequada de modo que o cristal de Ti:safira não sobreaqueça.

5. Amplificador Regenerativo

Amplificador para pulsos ultracurtos

Slewrate: 100 kHz, Ordem de ganho: 10^3 a 10^6

É um conjunto formado pelo *pulse picker* que é responsável por reduzir a frequência do laser semente, um *stretcher* responsável pelo alongamento do pulso para poder iniciar-se a amplificação de forma eficiente, também é formado por uma cavidade de espelhos no qual permite que os pulsos do laser semente absorvam energia do laser de bombeio e na saída possui um compressor para estreitar o pulso alargado no início do processo.

6. Notebook com software de controle

Notebook com os software EVOLUTION, SDG e LIBRA.

A função desse dispositivo é permitir o controle digital do EVOLUTION e LIBRA por meio de software assim como a sincronização também de maneira digital, por meio do software SDG.

Além do sistema laser Libra-S, outro componente extremamente importante para a marcação é o *Scanner* LSSL-1064-10-S da Sintec Optronics, que é um sistema de varredura óptico servo-controlado, que permite através dos sinais recebidos da placa LMC2014 FIBER CUH v3, figura 19, movimentar os servomotores. Após a imagem feita no software EZcad e a solicitação para marcação, botão MARK, o mesmo transmite os dados via USB para a placa LMC2014 FIBER CUH v3, na qual ocorre a conversão dos sinais recebidos, separando-os; posteriormente o sinal responsável por cada ação é transmitido separadamente por meio do slot DB25. Na lista 1 estão as especificações do *scanner*.

1. Especificações do *Scanner* LSSL-1064-10-S

Abertura : 10 mm

Tempo de resposta do passo: 0.40ms

Alimentação: $\pm 15\text{VDC}$ (máx 3A em cada galvanômetro).

Figura 19: Placa de controle LMC2014 FIBER CUH v3.



Fonte: Adaptado de (TECHNOLOGY,)

As figuras 20, 21, 22, 23, 24 e 25 são o Evolution, Vitesse, SDG, Libra/Amplificador Regenerativo, *Scanner* e software EZcad, respectivamente.

Figura 20: Laser evolution - Coherent.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21: Laser Vitesse - Coherent.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22: SDG - Coherent.



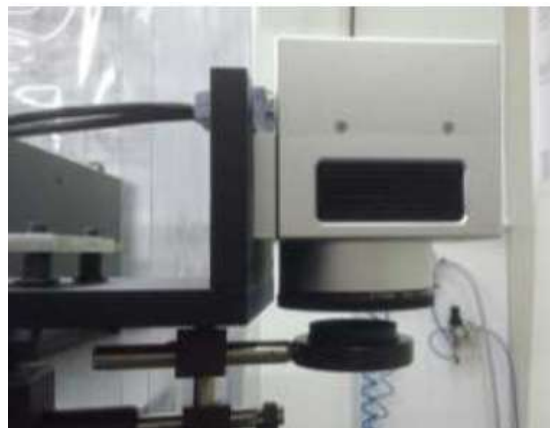
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23: Libra/Amplificador Regenerativo - Coherent.



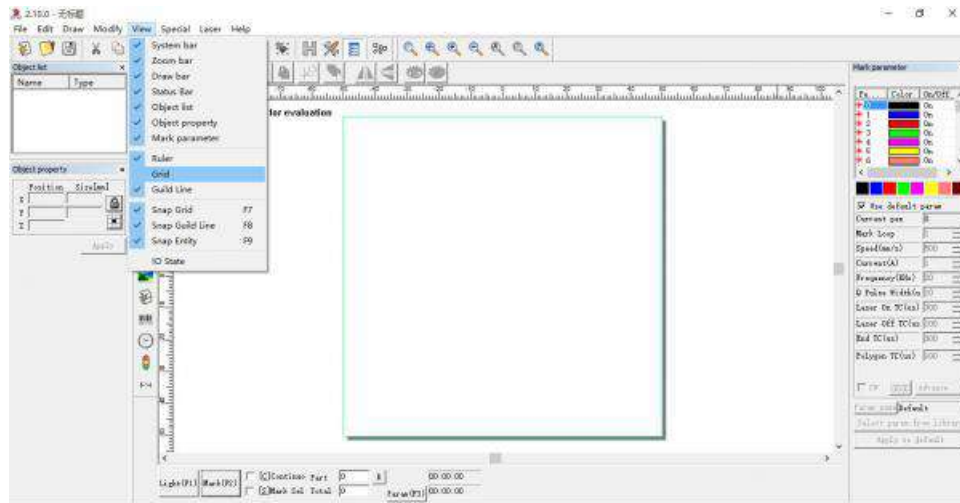
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24: *Scanner - Sintec Optronics.*



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 25: Software EZcad - Beijing JCZ Technology.



Fonte: Elaborado pelo autor

Descrito todo o sistema, é fundamental mencionar que dentre os parâmetros destacados na subseção Formação dos *ripples* na seção Fundamentos Teóricos, podem ser controlados por esse sistema apenas a potência através do SDG, a polarização do feixe através de um polarizador óptico na saída do scanner, a velocidade de marcação e taxa de repetição por meio do software EZcad. Desse modo, as marcações serão realizadas com base nesses parâmetros controláveis e interliga-los às equações teóricas de modo a validá-las experimentalmente. Após a realização das marcações, a análise dos *ripples* é realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), sendo possível obter imagens das nanoestruturas das marcações. Com as imagens adquiridas via MEV, e sendo que a taxa de pixels em todas as imagens é constante, pode-se utilizar o software Adobe Photoshop e adquirir a quantidade de pixels entre os períodos e, por meio da equação 3.1 pode-se obter a medida da periodicidade dos *ripples*.

$$\Lambda = \frac{X[nm] \cdot Y[pixels]}{340[pixels]}. \quad (3.1)$$

Onde X é o valor em nanômetros da distância de 340 pixels, dado pela escala da imagem, Y é a quantidade de pixels entre o pico de um *ripple* e outro e, Λ é o valor da periodicidade.

3.3 Sistema de montagem em bancada

Na montagem do sistema em bancada utilizou-se dos seguintes equipamentos:

- *Pulse picker* (Model 350-160)
- Driver do *pulse picker* 25D da Conoptics
- Contador síncrono 305 da Conoptics

3.3.1 *Pulse Picker* model 350

O *pulse picker* model 350 (figura 26) é do tipo transverso, ou seja o campo elétrico produzido pela tensão aplicada pelo driver é perpendicular à propagação óptica. No modelo 350 é utilizado o cristal Fosfato Dideutério de Potássio (KD*P), em outros modelos utilizam-se o cristal Fosfato de Dihidrogênio de amônio (ADP) ou o Tantalato de lítio. A tabela 4 indica um comparativo entre os diferentes tipos de cristais utilizados nos *pulse-pickers* da Conoptics.

Figura 26: *Pulse picker* model 350



Fonte: Conoptics

Tabela 4: Tabela comparativa dos tipos de cristais.

	Model Number	V ½ wave @ 500nm	V ½ wave @ 830nm	V ½ wave @ 1064nm	V ½ wave @ 2500nm	Aperture Diameter	Resonances	Contrast Ratio @ 633nm and 1064nm	Length w/ Polarizer
ADP Crystal Series Wavelength Limits (240 to 800nm)*	M370	184	--	--	--	2.5mm	No	500:1, N/A	158mm
	M370 LA	263	--	--	--	3.5mm	No	500:1, N/A	158mm
	M380	92	--	--	--	2.5mm	No	500:1, N/A	253mm
	M390	115	--	--	--	3.5mm	No	500:1, N/A	272mm
KD*P Crystal Series Wavelength Limits (240 to 1100nm)*	M350-50	455	757	970	--	3.1mm	Yes ¹¹	500:1, 700:1	106mm
	M350-80	261	433	522	--	2.7mm	Yes	500:1, 700:1	137mm
	M350-80LA	360	600	720	--	3.5mm	Yes		137mm
	M350-105	226	376	472	--	3.1mm	Yes	500:1, 700:1	162mm
	M350-160	130	216	275	--	2.7mm	Yes	300:1, 500:1	215mm
	M350-210	113	188	240	--	3.1mm	Yes	300:1, 500:1	268mm
LTA Crystal Series Wavelength Limits (700 to 2000nm)	M360-40	--	312	400	950	2.7mm	Yes	N/A, 200:1	95mm
	M360-80	--	143	183	430	2.7mm	Yes	N/A, 100:1	174mm
	M360-120	--	107	138	323	2.7mm	Yes	N/A, 100:1	174mm
	M360-160	--	71	92	215	2.7mm	Yes	N/A, 100:1	215mm

Fonte: Conoptics

3.3.2 Driver 25D

O driver 25D ilustrado pela figura 27 da Conoptics possui topologia *Push-pull*, como já descrito em 2.3.4. O driver possui uma saída máxima de 175V P-P, onde apenas a saída do driver é saturável. Toda a resposta dos estágios do amplificador, com exceção da saída, é linear e a entrada do amplificador permite ao usuário selecionar entre os níveis TTL ou o nível baixo analógico como um formato de entrada.

No sistema montado é utilizado o modo de entrada analógico, pois nesse modo é possível a operação do contador síncrono 305 em conjunto com o driver 35D. Nessa configuração o contador 305 envia um pulso de alta velocidade de 0 a +1V, que é utilizado para operar o driver 25D no modo de “Pulse-Picking”.

O modo analógico é configurado de fábrica e a largura do pulso da saída analógica do contador é de aproximadamente 18 ns, caso seja necessário um pulso de largura maior é necessário utilizar um gerador de pulsos externo com largura de pulso e taxa de repetição ajustáveis.

O driver 25D apresenta tensão de saída máxima em 175V e mínima em 138V, o valor a ser utilizado é definido pelo usuário enquanto a saída do sistema é monitorada através de um osciloscópio. Também é possível se ajustar uma tensão de polarização DC a qual determina o ponto quiescente de operação. Por exemplo, caso o sistema esteja sendo utilizado como uma chave de alta velocidade, o usuário pode definir a intensidade do sistema como mínima quando a entrada lógica for de nível baixo, então quando o nível lógico for alto, a tensão máxima é obtida. O usuário pode definir qual o valor da tensão de polarização, tal valor pode atingir até +- 400V DC, dessa forma o sistema responderá mais rapidamente.(CONOPTICS, a)

Figura 27: Driver 25D.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.4 Contador síncrono 305

No sistema desenvolvido é utilizado o contador modelo 305, ilustrado pela figura 29 da Conoptics como uma alternativa ao SDG do LIBRA, ele utiliza a tecnologia ECL (Emitter Coupled Logic) para diminuir os *jitters*, ruído nos pulsos e possui uma taxa de repetição de até 140MHz. O sistema possui três modos básicos, *CW*, *gated* e *single shot*. No modo *CW* a saída apresenta trens de pulsos contínuos a uma taxa de repetição definida no painel frontal do aparelho, no modo *Gated* a saída apresenta blocos de trens de pulsos, onde a quantidade de pulsos em cada bloco é definido no painel frontal e a largura dos blocos é controlada por um pulso TTL aplicado na entrada do equipamento. Por fim o modo *Single Shot* apresenta em sua saída um pulso único correspondente à borda de subida do sinal TTL aplicada à entrada S.S. do aparelho, este modo de operação permite que o equipamento gere um único pulso de saída após ter dividido o *clock* por uma configuração *thumbwheel*. A saída é, portanto, atrasada no tempo em relação à entrada TTL pelo valor do display frontal e do *clock* de entrada.

Figura 28: Contador síncrono 305.



Fonte: Elaborado pelo autor

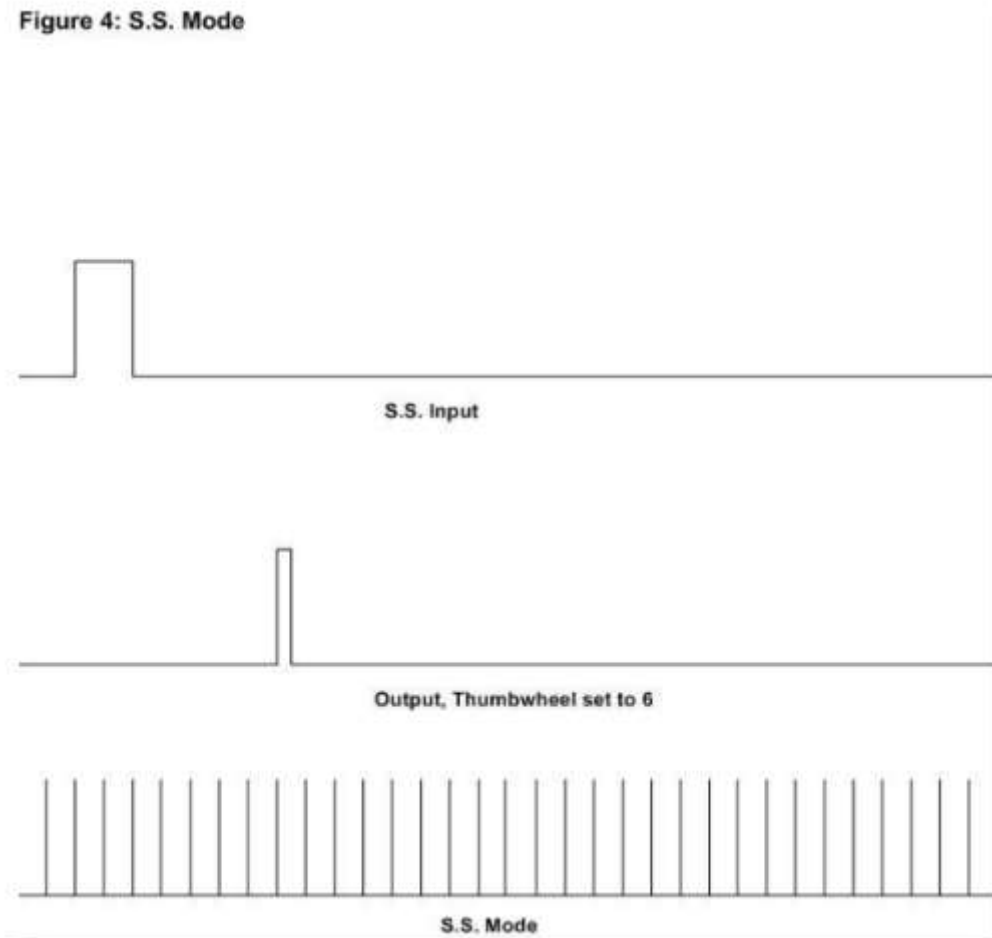
Há três saídas geradas pelo sistema, uma saída analógica de alta velocidade, uma saída TTL e um linha de sincronização. A linha de alta velocidade analógica é capaz de entregar até 70KHz, a TTL superiores a 1MHz e a linha de sincronização, toda a faixa disponível pelo aparelho (140MHz).

Por fim existem dois métodos de operação, o “mode locker input” e o com entrada externa. O sistema montado utiliza o método com entrada externa, nesse método um pulso óptico do laser é detectado por meio de um fotodiodo, então, o sinal gerado é utilizado como o *clock* base do sistema.

O contador no modo “Single Shot” recebe o sinal do fotodiodo na entrada S.S., então ele gera um pulso de saída em uma taxa determinada pelo *clock* base do sistema. A borda de subida positiva gerada na entrada habilita o contador que divide o *clock* de entrada pelo número digitado no painel frontal, assim um único pulso é gerado ao final desse tempo e o sistema espera por uma nova borda de subida na entrada S.S. (sinal de entrada). A figura 29 indica um gráfico mostrando as entradas e saídas do sistema. (CONOPTICS, b)

Figura 29: Gráfico de funcionamento do Contador Síncrono 305.

Figure 4: S.S. Mode



Fonte: ([CONOPTICS](#), b)

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Laser de Bancada

No processo de alinhamento dos elementos intra cavidade, inicialmente em um feixe apenas, obteve-se o valor observado no medidor de potência na figura 30:

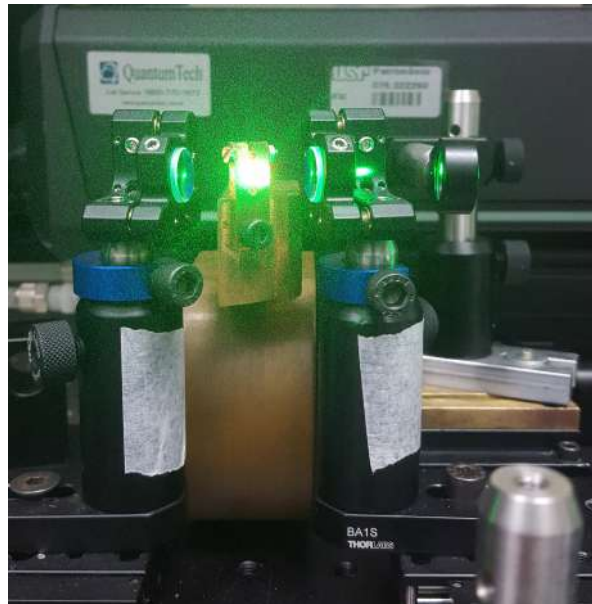
Figura 30: Valor atingido com apenas um feixe.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na configuração da cavidade ilustrada pela figura 31:

Figura 31: Imagem da cavidade com o laser Verdi incidindo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Unindo os dois feixes, conforme relatado na seção de Materiais e Métodos, obteve-se a potência ilustrada pela figura 32:

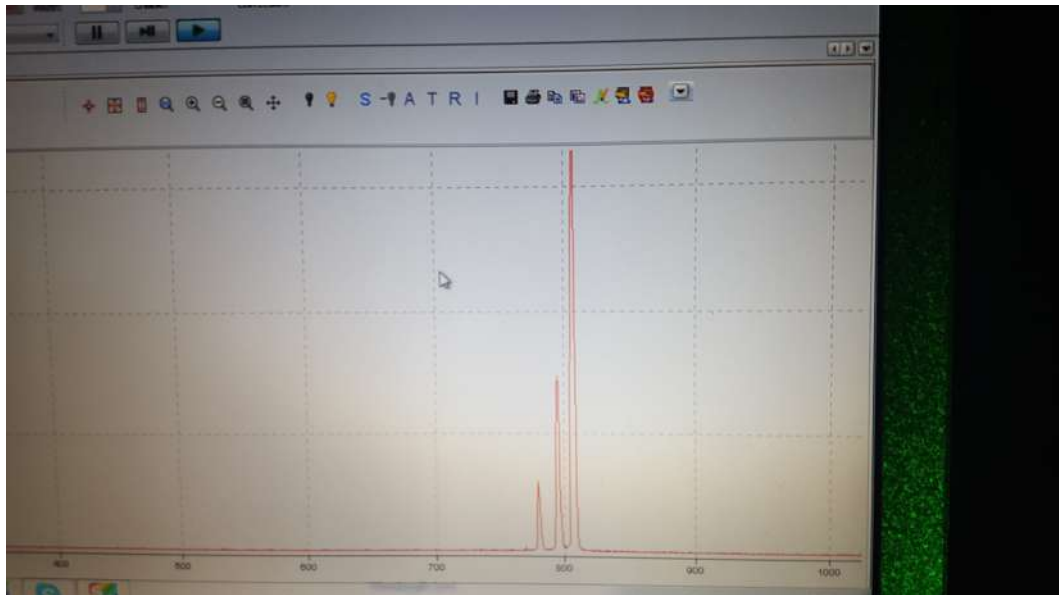
Figura 32: Valor atingido com a união dos dois feixes.



Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse estágio, obtêm-se picos observados no espectrômetro:

Figura 33: Imagem do espectro de comprimento de onda com o laser contínuo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para transitar para o modo pulsado, realizando o procedimento de aproximação da lente curva C2, obtém-se um feixe alongado:

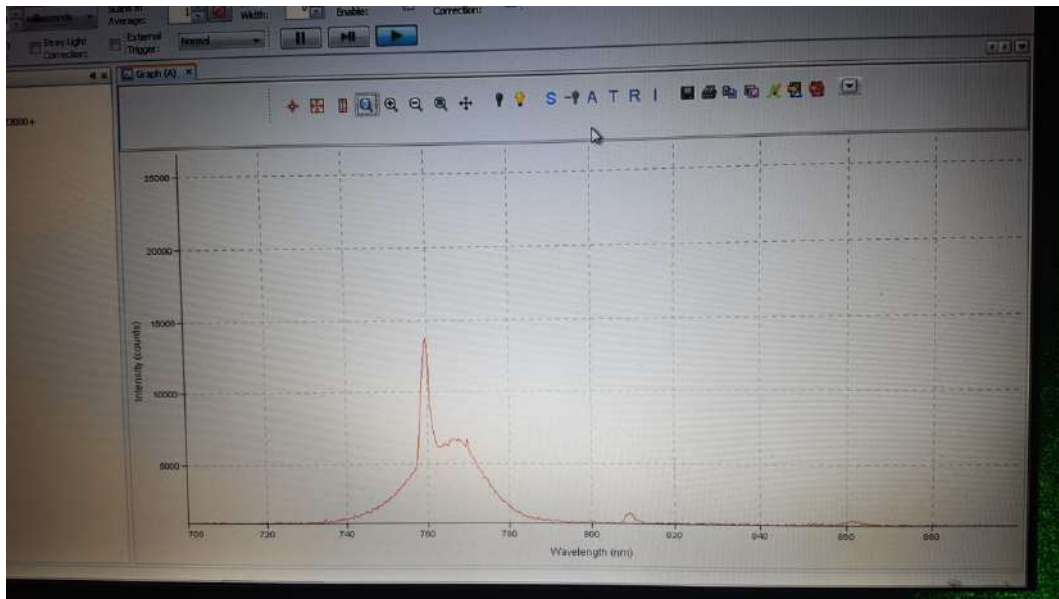
Figura 34: Imagem do feixe de saída no modo alongado antes de transitar para o pulsado.



Fonte: Elaborado pelo autor

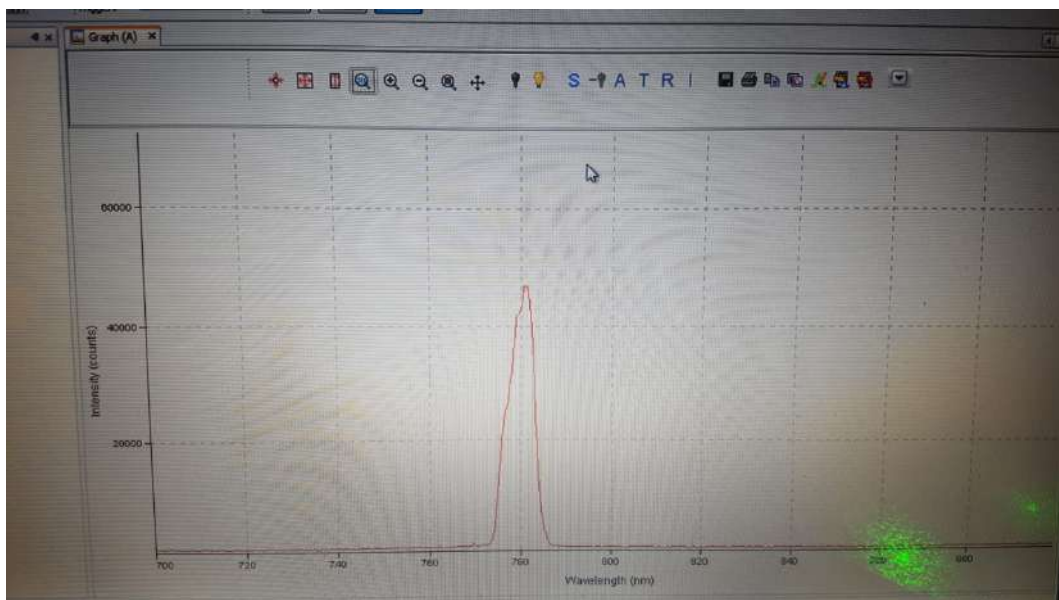
Neste momento, o espelho curvo C2 deve ser afastado vagarosamente do cristal, obtendo os seguintes espectros de comprimento de onda:

Figura 35: Imagem do espectro capturado quando o laser atingiu o modo pulsado instável.



Fonte: Elaborado pelo autor

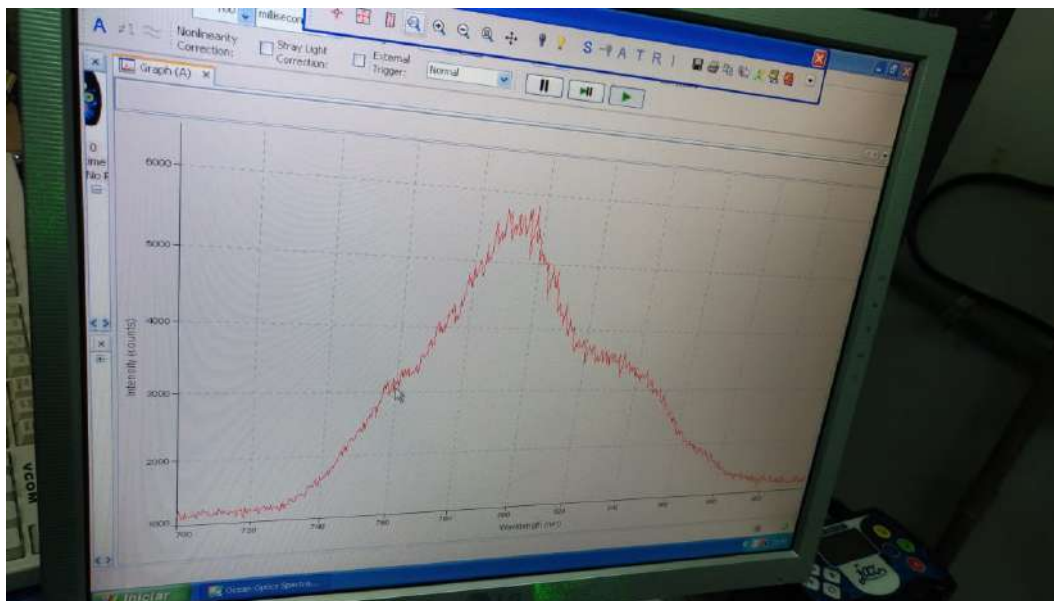
Figura 36: Imagem do espectro capturado quando o laser atingiu o modo pulsado instável.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os espectros observados não são espectros de um laser em modo pulsado de forma estável, atingindo a condição de modo pulsado estável deveria-se obter o espectro ilustrado pela figura 37.

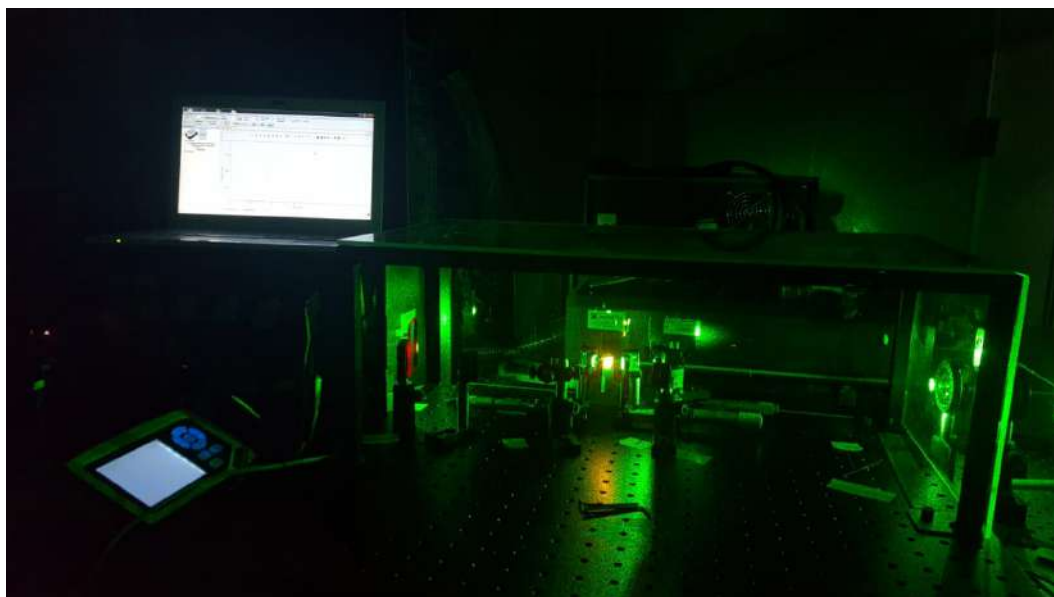
Figura 37: Imagem do espectro no modo pulsado estável.



Fonte: Grupo de Lasers e Aplicações da Unicamp

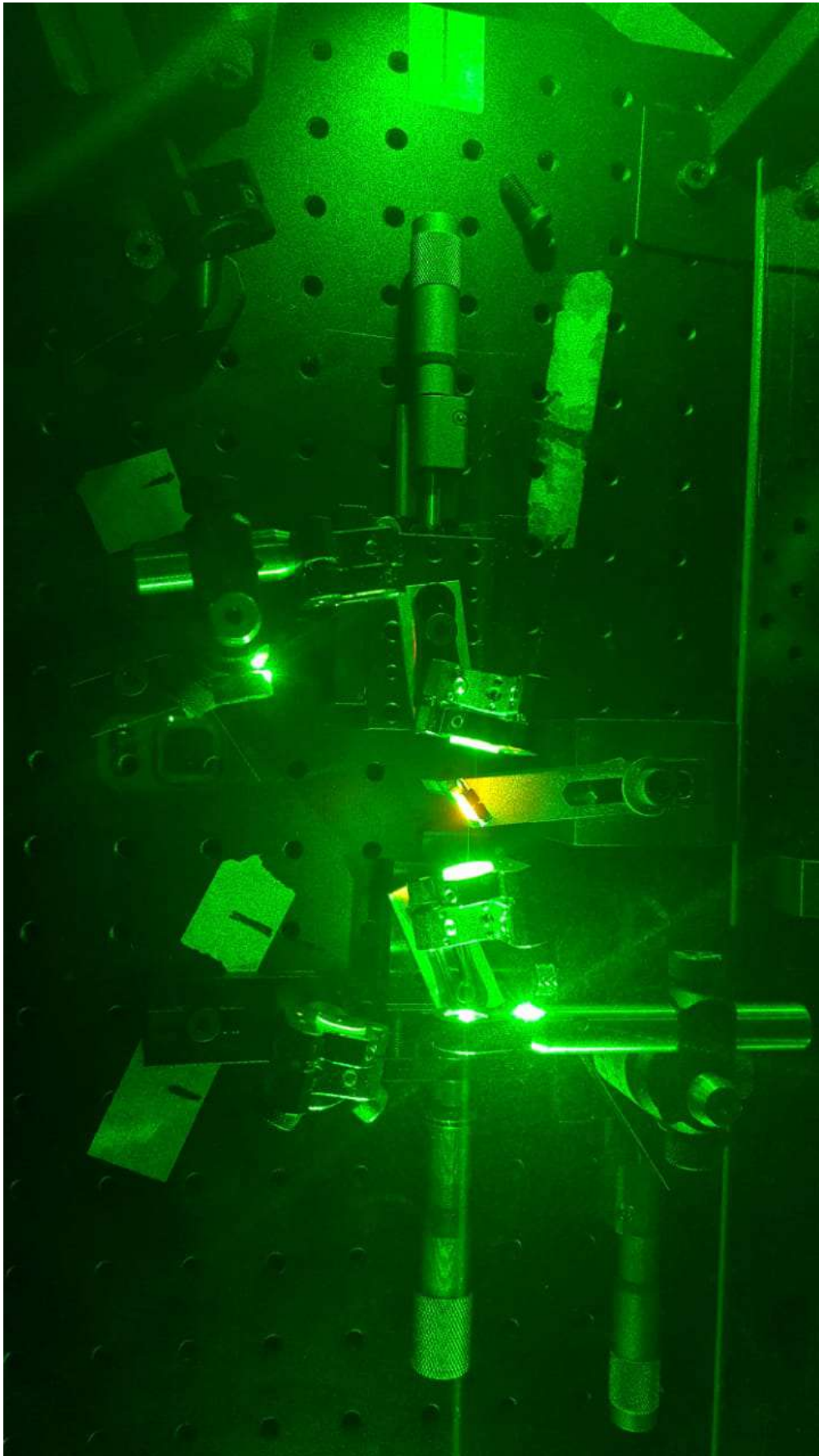
A seguir pode-se observar o sistema todo em funcionamento pela figura 38, e a figura 39 ilustra a cavidade vista por cima.

Figura 38: Imagem do sistema fechado em funcionamento.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 39: Imagem da cavidade vista por cima.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Formação dos *ripples*

Para se iniciar o processo de marcação, precisou-se ajustar o foco do feixe e para isso utilizou-se uma mesa XYZ, ilustrada pela figura 40. Esse ajuste de foco é necessário para atingir a máxima potência, ou seja, o foco é o ponto de maior rendimento.

Figura 40: Mesa XYZ.

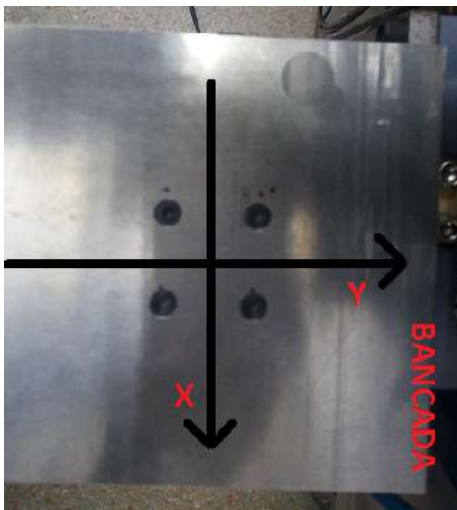


Fonte: Elaborado pelo autor

Nessa mesa é utilizada uma unidade arbitrária de medida, u.a, na qual cada 1 u.a equivale a 1mm , sendo assim para a amostra utilizada, que é uma placa de aço inox com 1.5mm de espessura, o foco foi de 735 u.a. Esse valor foi obtido colocando o laser em funcionamento, zerando a mesa e, aumentando a altura e observando a nitidez do laser na marcação, tudo sendo realizado em ambiente com iluminação quase nula.

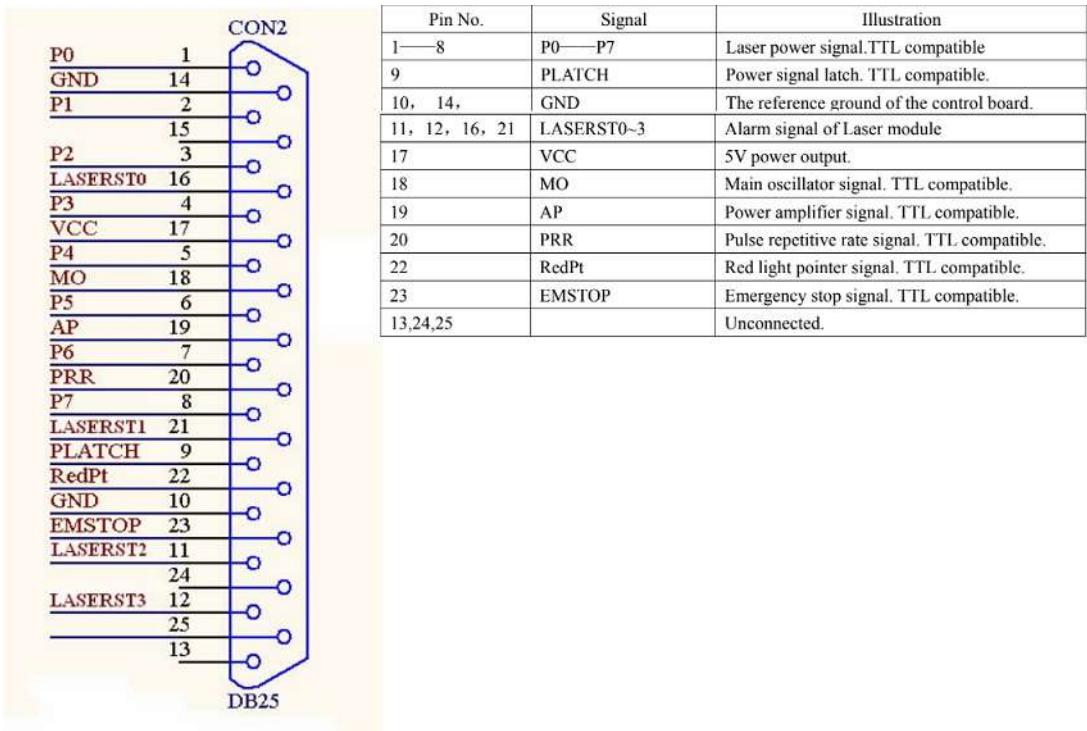
Na execução do início das marcações encontrou-se dificuldades de posicionamento da amostra. A altura foi ajustada, porém no eixo X e Y, no qual o *scanner* percorre, conforme ilustra a figura 41, não possui um ajuste no qual permita saber onde o feixe do laser incidirá. Tendo-se isso em vista, implementou-se uma mira para que possa ter uma referência na localização das marcações. Essa implementação foi possível, pois o software EZcad possui o recurso LIGHT, no qual emite um sinal via USB para a placa LMC2014 FIBER CUH v3, esta por sua vez emite um sinal de nível lógico alto no pino 22 da porta DB25, conforme indica a figura 42.

Figura 41: Representação eixo X-Y.



Fonte: Elaborado pelo autor

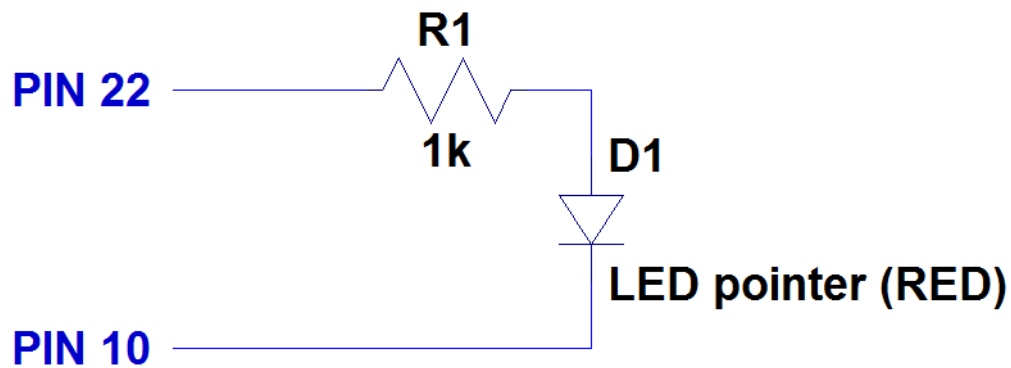
Figura 42: Pinos da porta DB25 da placa LMC2014 FIBER CUH v3.



Fonte: Adaptado de ([TECHNOLOGY](#),)

Identificado o pino responsável pelo sinal da mira, montou-se um simples circuito conforme indica a figura 43, na qual utilizou-se um resistor de 1kΩ, um LED vermelho, modelo LASER VERMELHO 650nm 5mW e fiação. O Resultado final encontra-se ilustrada na figura 44.

Figura 43: Circuito da mira para o laser LIBRA-S.



Fonte: Elaborado pelo autor

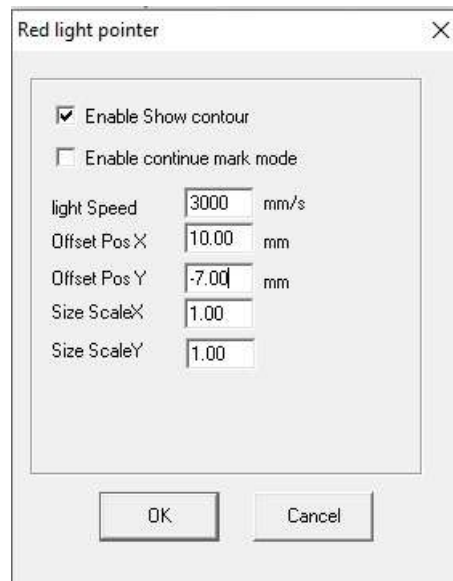
Figura 44: Mira para o laser LIBRA-S.



Fonte: Elaborado pelo autor

Foi necessário encontrar uma posição para que o feixe da mira pudesse incidir na entrada óptica do *scanner*. O ideal é que a mira incida de modo colinear com o feixe de LIBRA-S, porém para obter essa colinearidade haveria necessidade de abertura do laser e deslocamento de espelhos. Para evitar possíveis problemas nessas operações, optou-se por utilizar o recurso OFFSET do REDPOINT disponível no software EZcad, os valores podem ser visualizados na figura 45.

Figura 45: Valores de OFFSET para o posicionamento da mira.



Fonte: Elaborado pelo autor

Desenvolvida e implementada a mira, iniciou-se o processo de marcação, optou-se por iniciar a marcação sem o polarizador, de modo a estudar primeiramente a equação 2.12. dessa forma variou-se os seguintes parâmetros: *loop* (repetições), velocidade de varredura e espaçamento, detalhado na tabela 5.

Tabela 5: Variação dos parâmetros(*loop*, espaçamento e velocidade de varredura)

Numeração	Parâmetros		
	Velocidade[mm/s]	Repetições	Espaçamento[mm]
1	50	1	0.01
2	40	1	0.01
3	30	1	0.01
4	20	1	0.01
5	10	1	0.01
1	50	1	0.06
2		1	0.05
3		1	0.04
4		1	0.03
5		1	0.02
1A	50	3	0.01
1B		5	0.01
1C		10	0.01

As marcações podem ser vistas na figura 46.

Figura 46: Amostra marcada - Amostra 1.



Fonte: Elaborado pelo autor

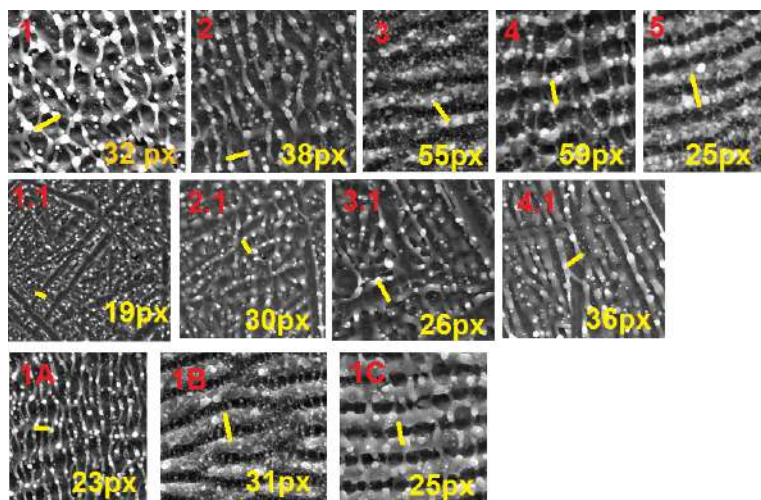
Concluídas as marcações na amostra, realizou-se a caracterização da amostra por meio de microscopia de varredura eletrônica através do MEV. Por esta técnica é possível obter-se imagens dos *ripples* e posteriormente realizar a estimativa da medida da periodicidade por meio da equação 3.1.

Figura 47: Escala Pixels por μm .



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 48: Imagens obtidas por meio do MEV com medidas em pixels.



Fonte: Elaborado pelo autor

Com as medidas em pixels obtidas, constrói-se a tabela 6

Tabela 6: Periodicidade da Amostra 1

Imagem	Pixels	Periodicidade[μm]
1	32	0.376
2	38	0.445
3	55	0.641
4	59	0.697
5	25	0.299
1.1	19	0.230
2.1	30	0.357
3.1	26	0.311
4.1	36	0.422
5.1	-	-
1A	23	0.27
1B	31	0.36
1C	25	0.293

A tabela 6 mostra a medida das periodicidades. É possível observar por meio da tabela 6 e figura 48, que quanto menor a velocidade mais definidos são os *ripples*, assim como também em maiores quantidade de *loop*, e conseqüentemente mais nítida a marcação.

Visualizando a figura 46, tabela 6 e analisando a equação 2.12, sendo que o laser LIBRA-S emite no comprimento de onda de 802nm, pode-se concluir que o único termo da equação 2.12, que pode ser o modificado considerando-se as variações de parâmetros utilizados, é o termo n_{es} . A quantidade de *loop*, velocidade de varredura nos experimentos realizados quase não modificaram o termo n_{es} . Na tabela 7 calculou-se o valor de n_{es} , manipulando a equação 2.12, de modo a isolar n_{es} , e utilizando os valores de comprimento de onda do laser LIBRA-S e as periodicidades obtidas por meio do MEV.

Desse modo, tem-se que a alteração da velocidade de varredura, *loop* (repetições) e espaçamento modificam pouco a periodicidade, sendo o parâmetro responsável por uma alteração significativa na periodicidade, o comprimento de onda, λ_L . No caso das marcações realizadas e conforme visto nas tabelas 6 e 7, a modificação de Λ é pequena, isso porque trabalhou-se com apenas um comprimento de onda, sendo assim, a cor visualizada será definida pela equação 2.11, na qual vai depender do ângulo de observação.

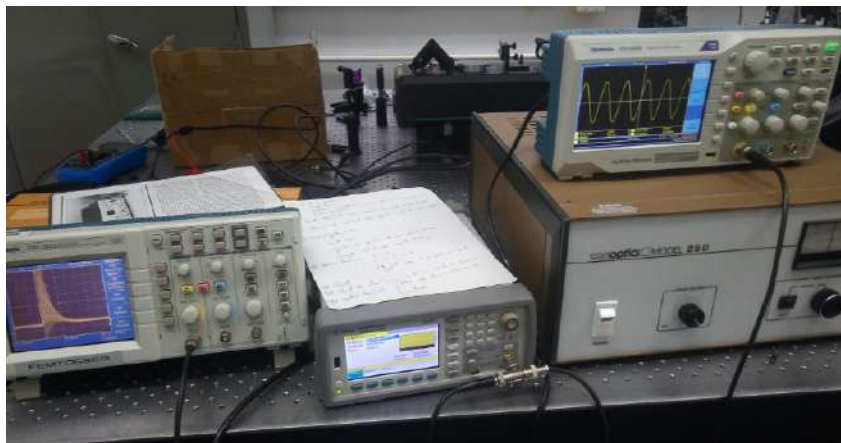
4.3 Sistema de sincronização

Do sistema descrito na seção 2.3 foi montado apenas o contador, visto que devido a diversos problemas o laser não pôde estar finalizado a tempo para testes utilizando o *pulse-picker*. A figura 49 ilustra a montagem realizada.

Tabela 7: Valores n_{es}

Imagem	Periodicidade[um]	n_{es} (aproximado)
1	0.376	1
2	0.445	0.99
3	0.641	0.99
4	0.697	0.99
5	0.299	0.99
1.1	0.230	1
2.1	0.357	1
3.1	0.311	0.99
4.1	0.422	0.99
5.1	-	-
1A	0.27	0.99
1B	0.36	0.99
1C	0.293	0.99

Figura 49: Montagem realizada para o teste do contador.



Fonte: Elaborado pelo autor

Como *clock* base para o contador foi utilizado um gerador de sinais MF-7130 da Minipa, indicado na figura 50.

A partir dos resultados do osciloscópio da figura 49 constatou-se que o contador funciona perfeitamente e que o sinal de *trigger* disponível em sua saída é compatível com a divisão da frequência dada pelo painel frontal do contador. O tempo de resposta do sistema (*pulse-picker*, contador e driver) é dado pelo tempo do contador, uma vez que é o dispositivo mais lento dentre os três, dessa forma o sistema é capaz de responder em até $14\mu s$.

Figura 50: Gerador de sinais Minipa.



Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONCLUSÃO

Realizados todos estudos descritos na seção 2 sobre o funcionamento, parâmetros de marcação e controle do laser, além dos testes realizados descritos na seção 4, conclui-se que é possível a produção de um laser e a realização do controle da taxa de repetição. Entretanto no sistema de controle atual não é possível o controle pulso a pulso do laser, visto que a sua taxa de repetição é da ordem de 1 GHz. São controlados trens de pulsos e não apenas pulsos individuais, isso ocorre devido a alta taxa de repetição do laser e o tempo de resposta do sistema do *pulse picker* (acionamento, controle e as PC).

O tempo de resposta do sistema do pulse picker é da ordem de $14\mu s$ com isso tem-se que em média a quantidade mínima por trem de pulsos é de 14000 pulsos. Dessa forma devido as limitações de hardware não é possível o total controle da taxa de repetição.

Apesar dos testes com o laser de femtossegundos com taxa de repetição em 1 GHz não puderem ser realizados, os testes apresentados na seção 4 indicam que a marcação é possível.

Por fim o sistema montado ao longo do TCC apresenta-se como um passo na direção da construção de um laser pulsado em femtossegundos com controle da taxa de repetição. A tecnologia laser para marcação colorida apresenta grandes desafios para a engenharia e física, sendo necessário o trabalho contínuo para que os desafios sejam superados. Dessa forma o sistema mostra-se como uma prova de conceito viável do projeto proposto, espera-se que o projeto seja continuado e que resultados ainda mais promissores sejam atingidos.

A continuação dos trabalhos deve ser focada no estudo de equipamentos mais modernos para o controle da taxa de repetição pulso a pulso, além também do foco na obtenção do laser pulsado de forma estável, sendo possível o teste do controle por trem de pulsos.

REFERÊNCIAS

- BOYD, R. W. Óptica não linear. **Elsevier**, 2007.
- BRLABS. **Manual de alinhamento Laser de Ti:Safira Femtosegundos TIS-ML-01**. [S.l.: s.n.].
- _____. **Manual de alinhamento - laser Ti:Safira Femtossegundos**. [S.l.], 2011.
- CALEB, Q. C.; Ariel, A. Theory of chirped photonic crystals in biological broadband reflectors. **Journal of the Optical Society of America**, p. 1436–1439, 2016.
- CONOPTICS. **Model 25D Manual**. [S.l.: s.n.].
- _____. **Model 305 Synchronous Countdown System**. [S.l.: s.n.].
- DUSSER, B. et al. Controlled nanostructures formation by ultrafast laser pulses for color marking. **Optical Society of America**, 2009.
- ENCYCLOPEDIA, P. **Pockel Cells**. [s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.rp-photonics.com/pockels_cells.html>. Acesso em: 23.10.2018.
- IONIN, A. A. et al. Femtosecond laser color marking of metal and semiconductor surfaces. **Appl phys A** **107**:301-305, 2012.
- LI, G. et al. Femtosecond laser color marking stainless steel surface with different wavelengths. **Applied Physics A. Berlin Heidelberg**, 2014.
- MANIK, G. M.; Anjali, M. P. Femtosecond lasers and laser assisted in situ keratomileusis (lasik). **American Academy of Ophthalmology**, 2015.
- MOULTON, P. F. Spectroscopic and laser characteristics of $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$. **Journal of the Optical Society of America B** vol3, issue 1, p. 125–133, 1986.
- NASA. **LASE Data and information**. [S.l.]. Disponível em: <https://eosweb.larc.nasa.gov/project/lase/lase_table>. Acesso em: 10.19.2016.
- PROJECT, A. **Pulse Picker MODEL OG8-25 MANUAL**. [S.l.: s.n.].
- RUTTEN, T. P.; N., W.; J., V. P. Fast rise time, long pulse width, kilo-hertz repetition rate q-switch driver. **Review of Sci. Instruments**, 2007.
- SAKABE, S. et al. Mechanism for self-formation of periodic grating structures on a metal surface by a femtosecond laser pulse. **Kyoto University**, 2009.
- SKOLSKI, J. Z. P. Modeling laser-induced periodic surface structures - an electromagnetic approach. **University of Twente**, 1985.
- _____. **Modeling laser-induced periodic surface structures**. [S.l.: s.n.], 2014.
- SOUZA, M. A. A. D.; Yasuoka, F. M. M. Desenvolvimento de um sistema de gravação e marcação colorida a laser de ti:safira pulsado femtossegundos através da formação de nanoestruturas (ripples) na superfície de diferentes materiais. **Relatório PIPE/FAPESP**, 2017.

TECHNOLOGY, B. J. **USBLMC Client Use Handbook Fiber Laser Control Board**. [S.l.: s.n.].

WOOLSTON, M. R. Fast eletronic driver for optical switches. **Colorado State University**, 2012.

ZILLIO, S. C. **Óptica moderna fundamentos e aplicações**. [S.l.: s.n.], 2018.