5 Referências Bibliográficas

- [1] VIM JCGM_200_2008
- [2] T.J. QUINN. Pratical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of optical frequency standards (2003). **Metrology**, Vol. 42, pp.323-325, 2005.
- [3] M. L. EICKHOFF; J. L. HALL. Optical frequency standard at 532 nm. IEEE Trans. Instruments. Measurements. vol. 44, pp. 155–158, Apr. 1995.
- [4] P. CORDIALE; G. GALZERANO; H. SCHNATZ. International comparison of two iodine-stabilized frequency-doubled Nd:YAG at λ = 532 nm. **Metrology**, vol. 37, pp. 177–182, 2000.
- [5] J. YE; L. ROBERTSSON; S. PICARD, L.-S. MA, AND J. L. HALL. Absolute frequency atlas of molecular I lines at 532 nm. IEEE. Trans. Instrum. Meas., vol. 48, pp. 544–549, June, 1999.
- [6] L. ROBERTSSON, S. PICARD, F.-L. HONG, Y. MILLERIOUX, P. JUNCAR, AND L.-S. MA. International comparison of I -stabilized frequency-doubled Nd:YAG lasers between the BIPM, the NRLM and the BNM-INM. Metrology, vol. 38, pp. 567–572, October 2001.
- [7] S. PICARD, L. ROBERTSSON, L.-S. MA, K. NYHOLM, M. MERIMAA, T. AHOLA, P. BALLING, P. KREN, AND J.-P.WALLERAND. A comparison of I2 –stabilized frequency-doubled Nd:YAG lasers at the BIPM. App. Opt., submitted for publication.
- [8] SIMON GEORGE, N KRISHNAMURTHY. Absorption spectrum of iodine vapor_Na experiment. 25 November 1998.
- [9] GERHARD HERZBERG, "Molecular spectra and Molecular Structure, I. Spectra of Diatomic Molecules".
- [10] ADY ARIE; ROBERT L. BYER; EDWARD L. GINZTON. Doppler-Free Spectroscopy of Molecular Iodine Near 532 nm. Stanford University, Stanford CA 94305.
- [11] LISHENG CHEN; WIBE A. DE JONG; JUN YE. Characterization of the molecular iodine electronic wave functions and potential energy curves through hyperfine interactions in the B0⁺_u (³Π_u) state. **Opt. Soc. Am. B**, Vol. 22, No. 5/May 2005/J.

- [12] A. RAZET, Y. MILLERIOUX AND P. JUNCAR. Hyperfine Structure of the 47R(9-2), 48P(11-3) and 48R(15-5) Lines of 12712 at 612 nm as Secondary Standards of Optical Frequency. **Metrology**, 28, 309-316 (1991).
- [13] R.S. MULLIKEN. The assignment of quantum numbers for electrons in molecules. **Physical Review**, vol. 32, pages 186 222 (1928).
- [14] MARKKU VAINIO, "Diode lasers with optical feedback and Optical injection Applications in Metrology", Doctoral Dissertation Helsinki University of Technology Department of Electrical and Communications Engineering Metrology Research Institute
- [15] BROYER, J. VIGUÉ AND J. C. LEHMANN. Effective Hyperfine Hamiltonian in Homonuclear Diatomic molecules. Application to the b state of molecular iodine. Le Journal de Physique, Vol. 39, Pag. 591. (1978).
- [16] M.D. LEVENSON AND A.L. SCHAWLOW. Hyperfine Interactions in Molecular iodine. Physical Review A, Vol.6, number 1, July 1972,.
- [17] A. RAZET. On the Hyperfine Spectrum of the 62P (17-1) Line of 12'12 at 576 nm. Metrology. 30, 193-195 (1993).
- [18] S. GERSTONKORN AND P.LUC. Atlas du Spectre d'Absortion de la Molecule d'Iode 14800-2000 cm-1 (Editions du Centre national de la Recherche Scientifique, Paris, 1978).
- [19] QUIM. I₂- A didactic molecule.. Nova, Vol. XY, No. 00, 1-x, 200_Pag.4
- [20] W-Y. Cheng, L. Chen, T.H. Yoon, J.L. hall, and J. Ye. Sub-Doppler molecular-iodine transitions near the dissociation limit (523-498 nm). Opt. Lett. 27, pp. 571-573 (2002).
- [21] H. TALVITIE, M. MERIMAA, E. IKONEN. Frequency stabilization of a diode laser to Doppler-free spectrum of molecular iodine at 633 nm. Opt. Commun, 152,182-188 (1998)
- [22] J. HU, E. IKONEN, K. RISKI. On the nth harmonic locking of the iodine stabilized He-Ne laser. **Opt. Commun**. 120, pp. 65-70 (1995).
- [23] Ray Transfer matrix. **Net**. Maio 2009. Disponível em: <u>http://en.wikipedia.org/wiki/Ray_transfer_matrix</u>
- [24] H. KOGELNIK, T. LI. Laser Beams and Resonators. APPLIED OPTICS / Vol. 5, No. 10 / October 1966.
- [25] L. LÉVESQUE. Divergence of far-infrared laser beam and collimation for Galilean and Keplerian system designs. Optics & Laser Technology, Volume 41, Issue 5, Pages 557-561, July 2008,.

- [26] Melles Griot. **Technical Guide**. 2009. Disponível em <u>www.mellesgriot.com "Gaussian Beam propagation"</u>
- [27] Lens. **Net**. Abril 2009. Disponível em <u>http://en.wikipedia.org/wiki/Lens_(optics)</u>.
- [28] Prometheus InnoLight. User.s Manual. Hannover, Version 4.4, 05.08.2003
- [29] J. HRABINA, P. JEDLIČKA, J. Lazar. Methods for Measurement and Verification of Purity of Iodine Cells for Laser Frequency Stabilization. MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, Volume 8, Section 3, No.5, 2008.
- [30] FENG-LEI HONG, JUN ISHIKAWA, JUN YODA, JUN YE, LONG-SHENG MA, JOHN L. HALL. Frequency Comparison of 12712 Stabilized Nd:YAG Lasers. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. vol. 48, no. 2, april 1999.
- [31] FENG-LEI HONG, JUN ISHIKAWA, ZHI-YI BI, JING ZHANG, KATUO SETA, ATSUSHI ONAE, JUN YODA, E HIROKAZU MATSUMOTO. Portable I2-Stabilized Nd:YAG Laser for International Comparisons. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 50, no. 2, april 2001.
- [32] A. YU. NEVSKY, R. HOLZWARTH, M.ZIMMERMANN, TH. UDEM., "Frequency Comparison of I2 Stabilized lasers at 532 nm and Absolute Frequency Measurement of I2 Absortion Lines", Symposium Frequency Standards and metrology, September 2001,Germany.
- [33] FENG-LEI HONG, JUN ISHIKAWA, KAZUHIKO SUGIYAMA, ATSUSHI ONAE, HIROKAZU MATSUMOTO, JUN YE, e JOHN L. HALL. Comparison of Independent Optical Frequency Measurements Using a Portable Iodine-Stabilized Nd:YAG Laser. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 52, no. 2, April 2003.
- [34] L. ROBERTSSON, M. ZUCCO e L.-S. MA. "Absolute frequency measurements of the 532 nm radiation recommended for the realization of the metre", Report BIPM-2003/07.
- [35] K. NYHOLM, M. MERIMAA, T. AHOLA, A. LASSILA. Frequency Stabilization of a Diode-Pumped Nd:Yag Laser at 532 nm to Iodine by Using Third-Harmonic Technique. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 52, n°. 2, abril 2003.
- [36] THOMAS J. KANE, ROBERT L. BYER. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser. Opt. Lett. 65, Vol. 10, No. 2 (1987).
- [37] THOMAS J. KANE, ALAN C. NILSSON, e ROBERT L. BYER. Frequency stability and offset locking of a laser-diode-pumped

Nd:YAG monolithic nonplanar ring oscillator. **Opt. Lett**. 12, 175-177 (1987)

- [38] FREITAG I., TUNNERMANN A.; WELLING H. Power scaling of diode-pumped monolithic Nd:YAG lasers to output powers of several watts. **Optics Communications**, Volume 115, Number 5, 1 April 1995, Pág. 511-515.
- [39] NASA's Jet Propulsion Laboratory. **Artículo**. Disponível em: <u>http://www.techbriefs.com/content/view/2550/</u>. Janeiro 2008.
- [40] Física-Online. Articulo Disponível em: <u>http://efisica.if.usp.br/otica/universitario/polarizacao/isolador_otico/</u>. 2007.
- [41] D.J. HOPPER, "Investigation of laser frequency stabilization using modulation transfer spectroscopy", Queensland University of Technology, Pag.53, (2008).
- [42] S. FREDIN-PICARD, "A Study of Contamination in 12712 Cells Using Laser-Induced Fluorescence", Metrology Vol.26. 235 -244 (1989).
- [43] R. KLEIN, A. ARIE, "Observation of iodine transitions using the second and third harmonics of a 1.5-μm laser", Appl. Phys. B 75, 79–83 (2002).
- [44] Ferrotec Artículo. Disponível em: http://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric/thermalRef08/
- [45] Ady Arie and Robert L. Byer, "Laser heterodyne spectroscopy of 127l2 hyperfine structure near 532 nm", J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 10, No. 11, November 1993.
- [46] Wavemeter-WA-1500. Manual. Burleigh
- [47] R Felder. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2003).
 Metrology. 42 (2005) 323–325.
- [48] Long-Sheng Ma; Robertsson, L.; Picard, S.; Chartier, J.-M.; Karlsson, H.; Prieto, E.; Windeler, R.S. The BIPM laser standards at 633 nm and 532 nm simultaneously linked to the SI second using a femtosecond laser in an optical clock configuration. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions, Volume 52, Issue 2, Page(s): 232 – 235, April 2003.
- [49] Vitushkin, Leonid F.; Orlov, Oleg A., "A compact frequencystabilized Nd:YVO4/KTP/I2 laser at 532 nm for laser interferometry and wavelength standards", Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV.Edited,Volume 5856, pp. 281-286 (2005).

- [50] Wang-Yau Cheng, Lisheng Chen, Tai Hyun Yoon,† John L. Hall, and Jun Ye. Sub-Doppler molecular-iodine transitions near the dissociation limit (523–498 nm). OPTICS LETTERS, Vol. 27, N^o. 8. April 15, 2002.
- [51] A. Hecker, M. Havenith, C. Braxmaier, U. Stroßner, A. Peters. High resolution Doppler-free spectroscopy of molecular iodine using a continuous wave optical parametric oscillator. Optics Communications, Vol. 218, Pag. 131–134, (2003).
- [52] W. Demtröder, "Laser spectroscopy", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pag-433, Germany (1996).
- [53] M. D. Levenson, "Introduction to Nonlinear Laser Spectroscopy", Academic Press, 1982
- [54] Kroll, M., and K. K. Innes, Molecular Electronic Spectroscopy by Fabry-Perot Interferometry. Effect of Nuclear Quadrupole Interactions on the Line Widths of 155 the B3Πo+-X1Σg+ Transition of the I₂ Molecule, Journal of Molecular Spectroscopy, 36: 295-309 (1970).
- [55] S I. Tradução da publicação do BIPM. "Resumo do Sistema Internacional de Unidades SI". Inmetro-2006.
- [56] Titov A.; Malinovsky I.; Erin M. Determination of saturation parameter in iodine and precise molecular linewidth measurements in He-Ne/I2 standard at 633 nm. Optics Communications, Volume 136, Number 3, 15 March 1997, pp. 327-334(8).
- [57] J. Rutman and F-L. Walls. Characterization of frequency stability in precision frequency sources. IEEE 79, pp. 952-959 (1991).
- [58] Instituto de Tecnologia J.Sabato. Módulos termoeléctricos Peltier. Artículo. 2006.

Apêndice A: Cristal Nd:YAG

O cristal Nd:YAG Innolight Promotheus 20 de dimensões $3 \ge 8 \ge 12$ mm³ possui um desenho monolítico especial do tipo NPRO (Non Planar Ring Oscillator). Este cristal estável, compacto e duro é bombeado por um laser de diodo multimodo com um feixe de 808 nm de comprimento de onda. Este feixe é confinado dentro do cristal Nd:YAG de 6 lados. Por meio de revestimento óptico sobre a face frontal (1) e de reflexão interna total nas três faces posteriores (2,3,4), o cristal Nd:YAG pode emitir um feixe laser de 1064 nm ou 1319 nm, dependendo do revestimento óptico da face frontal. Para restringir a saída do feixe a uma só freqüência, é necessário focalizar o feixe de bombeamento dentro de um ângulo sólido (Ω) e uma área A definidos [36 - 38].



Configuração de um NPRO [39]: Na face 1 - onde a radiação é transmitida parcialmente - ocorre a polarização. Nas faces 2,3 e 4 ocorre a reflexão interna total. O campo magnético é aplicado para estabelecer uma oscilação unidirecional. A rotação magnética ocorre nos caminhos 1-2 e 4-1.

Apêndice B: Verificação do Wavemeter WA-1500 Burleigh

O *wavemeter* WA-1500 da Burleigh foi verificado mediante a montagem experimental abaixo por medir diretamente o comprimento de onda de um laser padrão He-Ne / 633 nm Agilent 5519A. A verificação foi realizada em condições ambientais (temperatura e umidade) controladas no laboratório.



Esquema da montagem para calibração do wavemeter WA-1500.

a) Procedimento

A configuração óptica do *wavemeter* WA-1500 é um interferômetro de Michelson modificado [46], como mostra a figura acima. Ele possui um laser He-Ne interno que serve de referência durante uma medição (*Reference Laser*). Os feixes do laser *Reference Laser* e do laser externo *Input Laser* (neste caso o laser He-Ne padrão da Spectra Physics) percorrem os caminhos do interferômetro em direções opostas. Para uma boa colinearidade entre os dois feixes, pode-se usar o *Tracer Beam* (ver figura abaixo) como base para alinhamento. A varredura dos braços do interferômetro é feita com um dispositivo retro-refletor que desliza ida e volta numa distância de alguns centímetros da trajetória óptica. O número de franjas de interferência *m* gerado por cada um dos lasers é registrado por fotodetectores separados. O comprimento de onda é calculado usando a seguinte equação interferométrica de Michelson modificada:

$$(m_{He-Ne}\lambda_{He-Ne})/n_{He-Ne} = (m_{test}\lambda_{test})/n_{test} = 4d$$

Onde:

 m_{He-Ne}/m_{test} : número de franjas gerado pelo laser de referência/laser externo. n_{He-Ne}/n_{test} :: índice de refração do ar para $\lambda_{He-Ne}/\lambda_{test}$ medidos pelo *wavemeter* (via

sensores de temperatura e de umidade internos ao instrumento). $\lambda_{\text{He-Ne}}/\lambda_{\text{test}}$: comprimento de onda do laser de referência/laser externo. *d*: distância percorrida pelo retro-refletor.

O fator 4 na equação acima é devido ao fato de que a diferença de caminhos ópticos entre os dois feixes é duas vezes maior do que num interferômetro comum de Michelson, onde somente um dos espelhos é deslocado.

Deduzimos então:



$$\lambda_{test} = (m_{He-Ne} / m_{test})(n_{test} / n_{He-Ne})\lambda_{He-Ne}$$

Configuração óptica do Wavemeter WA-1500

b) Resultados

Duas séries de medidas foram realizadas em dias diferentes com novos alinhamentos, e os seguintes resultados foram obtidos (média de 10 valores para cada série):

1ª média do laser Agilent 5519A:	
Comprimento de onda no vácuo:	$\lambda=632{,}992\pm0{,}006~nm$
2ª média do laser Agilent 5519A:	
Comprimento de onda no vácuo:	$\lambda = 632,991 \pm 0,006 \text{ nm}$

O valor do comprimento de onda do laser padrão Agilent 5519A segundo seu último certificado de calibração, é:

632,991 366± 0,000027 nm

Os valores medidos pelo *wavemeter* se acham então compatíveis com os valores dos certificados, dentro das barras de incerteza dos dois comprimentos de onda.

Apêndice C: Colimador Ótico de duas lentes



Colimação do feixe com duas lentes

A matriz de transferência do raio (método Matriz ABCD) [23-24] usada para um feixe Gaussiano servirá para estimar a distância de separação s entre as duas lentes colimadas L1 e L2 de tal forma que a posição da cintura do feixe ℓ seja a desejada. Na Fig.1 se amostram as distâncias que serão calculadas s, ℓ e R1 que é o raio de curvatura da lente L1 e por sua vez o comprimento focal de L1, onde será medida a cintura do feixe que sai do laser.

A matriz M descreve o sistema total mostrado na Fig.1 que é dado pelo produto das 5 matrizes [25]

$$M = T_{out} L_2 S L_1 T_{in}$$

Onde:

 T_{out} : é uma matriz que descreve a translação da propagação do feixe desde a saída da lente L2 até a cintura do feixe final.

 L_1, L_2 : matrizes das lentes convergentes

S: matriz de translação que descreve a propagação do feixe tendo como meio o ar entre ambas as lentes.

 T_{int} : matriz de translação para a propagação do feixe desde a cintura do laser ate a lente L1.

$$M = T_{out}L_2SL_1T_{int} = \begin{bmatrix} 1 & \ell \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

Nota: Para uma lente convergente - 1/f

Para o feixe Gaussiano de comprimento de onda λ , raio de curvatura R e raio do diâmetro do feixe w₀, é possível definir um parâmetro de feixe complexo $\tilde{q}(z)$ por:

onde em z=0; R₀
$$\rightarrow \infty \Longrightarrow$$
 da Eq. (2) temos $\tilde{q}_0 = -j \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$

Tomando R₂ $\rightarrow\infty$, temos $\tilde{q}_2 = -j\frac{\pi\omega_2^2}{\lambda}$

Segundo a fórmula de propagação [5]:

$$\widetilde{q}_2 = \frac{A\widetilde{q}_0 + B}{C\widetilde{q}_0 + D} \dots (3)$$

Onde:

 $\widetilde{q}_{\scriptscriptstyle 0}$: o raio complexo do diâmetro do feixe que sai do las
er

 \tilde{q}_2 : o raio complexo do diâmetro do feixe que sai da lente L₂ numa distância ℓ Para encontrar a ótima distância de separação s entre as lentes L₁L₂, de forma que a posição ℓ da cintura do feixe final (w₂), seja um valor máximo usamos as equações (2) e (3) para encontrar a:

$$\frac{1}{\tilde{q}_{2}} = \frac{C\tilde{q}_{0} + D}{A\tilde{q}_{0} + B} = \left(\frac{C\tilde{q}_{0} + D}{A\tilde{q}_{0} + B}\right) \left(\frac{B - A\tilde{q}_{0}}{B - A\tilde{q}_{0}}\right) = \frac{(BC - AD)\tilde{q}_{0} - AC\tilde{q}_{0}^{2} + BD}{A^{2}\tilde{q}_{0}^{2} + B^{2}}$$
Fazendo: $\frac{\pi\omega_{0}^{2}}{\lambda} = \delta_{L}$; $\tilde{q}_{0}^{2} = -\delta_{L}^{2}$, temos:
 $-\frac{\lambda}{\pi\omega_{2}^{2}}j = \frac{(BC - AD)\delta_{L}j - AC\delta_{L}^{2} + BD}{A^{2}\delta_{L}^{2} + B^{2}}$(4)

Tomando a parte real da Eq. (4):

$$o = \frac{AC\delta_L^2 + BD}{A^2\delta_L^2 + B^2}$$
, e substituindo em ela as componentes da matriz M, temos:

A magnifição, $\frac{w_2}{w_0}$ é encontrada das partes imaginárias da Eq. (4).

Apêndice D: Cálculo de características do TE

Como o objeto a ser resfriado está em contato íntimo com a superfície fria do TE, a temperatura desejada do objeto (T_C) pode ser considerada a temperatura da superfície fria da pastilha.

1. Queremos resfriar o sistema a uma temperatura T_c (temperatura do lado frio) de -13° estando o laboratório a uma temperatura ambiente (T_{amb}) de ~22°C, então a temperatura máxima que se espera no lado quente é $T_h = T_{amb}$ -Tc=35°C (máxima temperatura a que chega o dissipador de temperatura (barra de corre) sobre T_{amb}), logo a diferença de temperatura entre a superfície exposta e o ambiente é

 $\Delta T = T_h - T_c = 48^{\circ}C.$

2. Precisamos determinar o calor, que o TE tem que absorver para resfriar nosso sistema.

 $Q_{total} = Q_c + Q_{isol}$

Da teoria, a energia térmica a transferir desde uma superfície ao ambiente é,

$Q_c = h.A_{cilin}.\Delta T$	(1)
E a energia de ganho das paredes do isolador	térmico (isopor).
$Q_{isol} = A_{isol}. \Delta T.K \Delta X$	(2)
Onde:	

 Q_c é o calor transferido ao ambiente desde a superfície em contato com o TE,

h é o coeficiente de transferência de calor, num meio ambiente em condições normais é igual a um valor de 23 a 28 W/($m^2 \circ C$).

 $A_{cilin.} = A_c + A_b$, área da superfície exposta (cilindro de cobre), em m²

 A_{isol} é a área da superfície externa do isolador ($A_{isol}=A_{ext}-A_{int}$)

 ΔT é a diferença de temperatura entre a superfície exposta e o ambiente

 $\Delta X = 0.01 \text{ m} \acute{e}$ a espessura do isolador (isopor)

K = 0,042 é a condutividade térmica do isolador (W/mK)

Calculando:

Da Eq. (1) avaliando $A_{cilin}=0,00175 \text{ m}^2$, segundo as dimensões do cilindro (Fig.21a), e considerando $h=23 \text{ W/(m}^2 \text{ °C})$ em condições normais controladas, temos $Q_c=1,93\text{ W}$.

Da Eq.(2) avaliando $A_{isol} = 0,0053 \text{ m}^2$, segundo as dimensões do isopor (ver Figura embaixo, e $\Delta T=35^{\circ}$ C (diferença de temperatura dentro e fora do isopor), temos $Q_{isol} = 6,30 \text{ W}$



(a) Dimensões do cilindro de cobre a ser resfriado, (b) dimensões do isolante térmico.

3. Finalmente do resultado das equações 1 e 2 a quantidade total de calor a ser removido de nosso sistema de esfriamento é Qtotal = 1,93 W + 6,30 W = 8,23 W, quere dizer que o Qc do TE de resfriamento elegido tem que ser ≥ 8,23 W.

Apêndice E: Funcionamento de um módulo Peltier

Um módulo Peltier consiste de dois ou mais elementos de material semicondutor. comumente telureto de bismuto, que estão conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo. Esses elementos e seus conectores estão montados entre duas placas de cerâmica (ver Fig.20b). As placas servem para manter mecanicamente a estrutura e para isolar eletricamente os elementos individuais e os da montagem externa. Na Fig.21, podemos ver que os elétrons podem viajar livremente no cobre, mas não assim nos semicondutores. Os elétrons abandonam o cobre e entram no lado quente do tipo p, enchendo os buracos para que possam se mover através do material liberando energia. Essencialmente os buracos no tipo p são movidos desde a parte fria até a parte quente. Logo, ao passar do tipo p ao cobre os elétrons absorvem energia. Outra vez os elétrons se movimentam livremente a través do cobre, até alcançar a zona fria do semicondutor tipo n. Ao ingressar neste, eles absorvem energia para poder se movimentar através do semicondutor. Finalmente, quando os elétrons abandonam o lado quente do tipo n, podem se mover livremente no cobre liberando energia.

Schematic of a Thermoelectric Cooler



Sistema de resfriamento de um Peltier