

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMANO, C., MATSUO, S., KUROKAWA, T. and IWAMURA, H. 20dB contrast GaAs/AlGaAs multiple quantum well nonresonant modulator. **IEE Photonics Technology Letters**. Vol 4, No 1, 1992.

ADACHI, S. Optical dispersion relations for GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb, AlGaAs and InGaAsP. **Journal Applied Physics**. Vol 66, No 12, p 6030, 1989.

ARTIGLIA, M., COPPA, G., DI VITA, M., POTENZA, M. and SHARMA, A. Mode field diameter measurements in single-mode optical fibers. **IEEE Journal of lightwave technology**. Vol 7, No 8, pp 1139–1152, 1989.

AUSTIN, M. Theoretical and experimental Investigation of GaAs/GaAlAs and n/n⁺ GaAs rib waveguides. **Journal of Lightwave Technology**, IEEE. Vol LT-2 No 5, pp 688-694, 1984.

BATTY, W. and ALLSOPP, D.W.E. Enhanced electroabsorption characteristics in δ -doped. **Electronics Letters**. Vol 29, p 2066, 1993.

BASTARD, G., MENDEZ, E.E., CHANG, L.L. e ESAKI, L. Éxciton binding energy in quantum wells. **Physics Review Letters**. Vol 26, No 4, p 1974, 1982.

BASTARD, G., MENDEZ, E.E., CHANG, L.L. e ESAKI, L. Variational calculations on quantum well in an electric field. **Physics Review Letters**. Vol 26, No 6, p 3241, 1983.

BASTARD, G. Wave mechanics applied to semiconductor heterostructures. **Éditions de Physique**. Les Ulis. 1988.

BUTLER, D.J., NUGENT, K.A. and ROBERTS, A. Characterization of optical fibers using near-field scanning optical microscopy. **Journal Application of Physics**, vol 75, No 6 . pp 2753-2756, 1994.

BIGAN, E. Modulateurs electro-absorbants en onde guidée pour liaisons optiques a 1.55 μm . **L'echo des Recherches**, No 149, pp 29-38, 1992.

BIGAN, E., HARMAND, J.C., ALLOVON, M., CARRE, M., CARENCO, A. and VOISIN, P. Wannier stark localization in a 1.55 μm InGaAs / InAlAs superlattice waveguide modulator structure. **Transactions Photonics Technology Letters**, vol 3, no 12, pp 1107-1109, 1991.

BHATTACHARYA, P. Semiconductor optoelectronic devices. Prentice Hall International Editions, 1994.

BRADLEY, P.J., PARRY G. and ROBERTS, J.S.. An optimized AlGaAs/GaAs multiple quantum well phase modulator. Engineering and quantum well devices. **IEEE colloquium on 27 october 1988**. pp 1- 4, 1988.

CAMBELL, S. A. **The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication**. Oxford University Press,1996.

CELLA, R., MERSALI, B., BRUNO, A., DAVY, S., BRUCKNER H. and LICOPPE, C. Imaging of the optical mode of waveguiding devices by scanning near-field optical microscopy. **American Institute of Physics. Journal Application of Physics**. Vol 78, No 7, pp 4339-4344, 1995.

CHANG, S.L. Physics of optoelectronic devices. Wiley series in pure and applied optics. **Wiley Interscience**. p 564,1995.

CHIN. M. K. On the figures of merit for electro-absorption waveguide modulators. **IEEE Photonics Technology Letters**. Vol 4, No 7, pp 726-728, 1992.

DAVID, A. B., MILLER, J.S., WEINER S. and D. S. CHEMLA. Electric field dependence of linear optical properties in quantum well structures: waveguide electroabsorption and sum rules. **IEEE Journal of Quantum Electronics**. vol QE-22 No 9, pp 1816-1830. 1986.

DEZAEL, F. Programa Sapectrum: Photocurrent modelisation in III-V semiconductor múltiple quantum web devices, Diretor: Mauricio Pamplona Pires, 2001.

DONG, HAOZHE e GOPINATH, ANAND. AlGaAs/GaAs ridge waveguides lasers on smi-insulating sunstrate with airbridged contacts with 21GHz modulations response frequency. **IEEE Microwave Symposium Digest MTT-S International**. Vol 1, pp 53-55, 1994.

Efros. Soviet Physic semiconductor. Vol 16, p 77, 1982.

GOLBERG, B.B., ÜNLÜ, M.S., HERZOG, W.D., GHAEMI, H.F. e TOWE, E. Near field optical studies of semiconductor heterostructures and laser diodes. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**. Vol 1, No 4, 1995.

GULDEN, K. H., KNEISSL, M., KIESEL, P., MALZER, S. and DOHLER, G.H. X. WU and J.S. SMITH. Enhanced absorption modulation in hetero n-i-p-l structures by constructive superposition of field effect and phase space filling. **American Institute of Physics. Application Physics**. Vol 64, No 4. pp 457-459, 1994.

HAMAKAWA, A., ISHIHARA, K., YAMAGUCHI, T., NAKANO, Y. and TADA, K.. InGaAs/InAlAs/InP 1.55 μm quantum wells with mass-dependent width-a useful building block for polarization-independent optical modulation. **Indium Phosphide and Related Materials, Conference Proceedings., Seventh International Conference on , 9-13 May**. pp. 551-554 ,1995.

HAO FENG, J.P. PANG, SUGIYAMA, M, K. TADA and NAKANO, Y. Field Induced optical effect in a five step asymmetric coupled quantum well with modified potential. **IEEE Journal of Quantum Electronics**. Vol 34, No 7, pp 1197-1208, 1998.

HADLEY, G.R. Transparent boundary condition for beam propagation method. **Optical Letters**. Vol 16, p 624, 1991.

HADLEY, G.R. Transparent boundary condition for beam propagation method. **Journal Quantum Electronics**. Vol.28, p 363, 1992.

HADLEY, G.R. Transparent boundary condition for beam propagation method. **Journal Quantum Electronics**. Vol.28, p 363, 1992

HARDLEY, G.R e SMITH, R.E. Full-vector waveguide modeling using an iterative finite difference method with transparent boundary conditions. **Journal Quantum Electron**, Vol 13, No 3, pp 465-469, 1995.

HARDLEY, G.R. Multistep method for wide-angle beam propagation. **Optics Letters**. Vol. 17, pp 1743, 1992.

HIBBS-BRENNER, M.K., RUDEN, P.P., LEHMAN, J.A., LIU, J.J. and WALTERSON, R.A. Optical properties of AlGaAs/GaAs nipi superlattices and their application in asymmetric cavity spatial light modulator. **Journal of Quantum Electronics**. Vol 30, No 5, 1994.

HOU, H.Q. e CHANG, T.Y. Nearly chirp-free electroabsorption modulation using InGaAs-InGaAlAs-InAlAs coupled quantum wells. **IEEE Phot. Tech. Lett.** Vol 7, p 167, 1995

INOUE, H., HIRUMA, K., ISHIDA, K., ASAI, T. and MATSUMURA, H. Low loss GaAs Optical waveguides. **Journal of Lightwave Technology**. Vol LT-3, No 6, December, pp 1270-1276, 1985.

IDO et al. Ultra high speed múltiple quantum well electro-absorption optical modulator with integrated waveguides. **Journal of Lightwave Technology**. Vol 14, p 2026, 1996.

ILIC, I., SCARMOZZINO, R. and OSGOOD, R.M. JR. Investigation of the Pade approximant-based wide-angle beam propagation method for accurate modeling of waveguiding circuits. **Journal of Lightwave Technology**. Vol 14, pp 2813-2822, 1993.

KATO, M., TADA, K. e NAKANO, Y. Wide wavelength polarization independent optical modulator based on tensile strained quantum well with mass dependent width. **IEEE Photonics Technology Letters**. Vol 8, No 6, 1996.

JUNGLING, S. e CHEN, J.C. A study and optimization of eigenmode calculations using the imaginary – distance beam-propagation method. **Journal Quantum Electron**. Vol 30, p 2098, 1994.

LOUR, W-S. High-Gain, Low Offset Voltage, and Zero Potential Spike by InGaP/GaAs δ -doped Single heterojunction Bipolar Transistor (δ -SHBT), **IEEE Trans. on Electron Devices**. Vol 44, p 346, 1977.

LOUR, W-S , C.L. Wu *et al* Very strong negative differential resistance real-space transfer transistor using a multiple δ -doping GaAs/InGaAs pseudomorphic heterostructure, **Applied Physics Letters**. Vol 66, p 739, 1995.

LOUR, W-S, Yang, G.M *et al*. δ -doped AlGaAs and AlGaAs/InGaAs high electron mobility transistor structures grown by metalorganic chemical vapor deposition. **Applied Physics Letter**. Vol 60, p 2380, 1992.

NUNES, F. D., PATEL, N. B., MENDOZA ALVAREZ, J. G. and RIPPER, J. E. Refractive –Index profile and resonant modes in GaAs laser. **Journal Apply Physics**. Vol 50, No 6, 1979.

MANUAL BEAMPROP™ .Version 5.0e. Rsoft Design Group, Inc. and Columbia University. 1993-2002.

MEE. K. CHIN, WILLIAM S. C. CHANG. Theoretical design optimization of multiple-quantum-well electroabsorption waveguide modulators. **IEEE Journal of Quantum Electronics**. vol. 29, No 9. pp 2476-2487. 1993.

NODA, S., KOJIMA, K., MITSUNAGA, K., KYUMA, K., HAMANAKA, K. e NAKAYAMA, T. Ridge waveguide AlGaAs/GaAs distributed feedback lasers. **IEEE Journal of Quantum Electronics**. Vol QE-23, No 2, 1987.

POWELL, O. Single mode conditions for silicon rib waveguides. **IEEE Journal of Lightwave Technology**. Vol 20, No 10, pp 1851-1855, 2002.

PIRES, M.P. Estruturas de poços quânticos múltiplos de InGaAs / InAlAs pra modulação eletro-óptica de amplitude. **Tese de Doutorado**, Departamento de Engenharia Elétrica PUC-Rio, Maio 1998.

PIRES, M.P, SOUZA, P.L., YAVICH,B.,PEREIRA, R. E CARVALHO, W. On the optimization of InGaAs-InAlAs quantum well structures for electroabsorption modulators. **Journal of Lightwave Technology**. Vol 18. No 4, p 598, 2000.

RACEDO, F. Crescimento epitaxial seletivo de estruturas semicondutoras III-V visando a integração optoeletrônica. **Tese de doutorado**. Departamento de Engenharia elétrica. Universidade Pontifícia Católica do Rio de Janeiro. Maio 2000.

RIBEIRO, M.L.G. Dopagem de carbono em camadas epitaxiais de InAlAs. **Disertação de mestrado**. Departamento de engenharia elétrica PUC-Rio. 2001.

SCHWANDER, M. , BÜRGER ,N., FEIFEL, T., HIRCHE, K., KORN, M., PANZLAFF,K., SCHÖTER, S., WARTH, M., KÖNIG, P. e HANGLEITER, A. Enhanced electroabsorption in tensile-starined $Ga_yIn_{1-y}As/Al_xIn_{1-x}As/InP$ quantum well structures, due to field-induced merging of light-hole and heavy-hole transitions. **Appl. Phys. Lett.** Vol 70, pp 2855, 1997.

SHUBERT, E.F., Spatial localization of impurities in δ -doped GaAs, **Applied Physics Letters**. Vol 52, p 1508, 1988.

SOUZA, P. L., YAVICH, B., PIRES, M.P., HENRIQUES, A. e GONÇALVES, L. C. D. Electronic and optical properties of periodically Si delta-doped InP grown by low pressure metalorganic vapor phase epitaxy, **Journal of Applied Physics**. Vol 82, p 1700, 1997.

SOUZA P. L., YAVICH, B., HENRIQUES, A., PEREIRA, R. G. e GONÇALVES, L. D. InGaAs/InAlAs pseudomorphic structures grown by LP-MPVPE for high mobility transistors, trabalho apresentado na **24th International Conference on the Physics of Semiconductors**, realizada entre os dias 2 e 7 de agosto de 1998 em Israel.

SCARMOZZINO, R. and OSGOOD, R.M. Jr. Comparison of finite-difference and Fourier-transform solutions of the parabolic wave equation with emphasis on integrated-optics application. **Journal Optical Society American, A**. Vol 8, p 724, 1991.

STEINMANN, P. BORCHERT, B. e STEGMÜLLER, B. Asymmetric quantum wells with enhanced QCSE: modulation behavior and application for integrated laser/modulator. **IEEE Phot. Tech. Lett.** Vol 9, p 191, 1997.

TOMAS, H., WOOD, R. and CHRAPLYVY, A. Observation of large quadratic electro-optic effect in GaAs/AlGaAs multiple quantum wells. **Apply Physics Letters**. Vol 50, No 13, 1987.

TRIBUZY VILLAS-BÔAS, C - A. Estudo de estruturas de poços quânticos múltiplos com dopagem *nipi* para modulação por Eletroabsorção. **Tese de Doutorado**. Departamento de Engenharia. Pontifícia Católica do Rio de Janeiro. Maio 2001.

TRIBUZY, VILLAS -BÔAS, C - B. , SOUZA, P.L., LANDI, S.M., PIRES.P.M., BUTENDEICH, R.,BITTENCOURT,A.C.,MARQUES,A.B.,HENRIQUES,A.B. Delta-doping superlattices in multiple quantum wells. **Physica E**. Vol 11, pp 261-267, 2001.

TRIBUZY, C.- A, LUSTOZA, P., AREIZA, M., LANDI, S., BORGSTRM, M. and PIRES, M. Enhanced electroabsorption in MQW structures containing an *nipi* superlattice. **International Conference on the Physics of Semiconductor - ICPS-27**. p 189, 2004.

TRIBUZY, C.V-B - B., PIRES, M. P., SOUZA, P. L., and YAVICH, B. Reliably Designing InGaAs/InAlAs strained multiple quantum well structures for amplitude modulation. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. Vol 52, pp 1592-1597, 2004.

VASSALO, C. and COLLINO, F. Highly efficient absorbing boundary condition for the beam propagation method. **Journal of Lightwave Technology**. Vol 14, pp 1570-1577, 1996.

WOLF, T., SHIEH, C.-L., ALAVI, K. e MANTZ, J. Lateral refractive index step in GaAs/AlGaAs multiple quantum well waveguides fabricated by impurity-induced disordering. **Applied Physics Letters**. Vol 55, No 14, 1989.

WOOD, T. H. Multiple quantum well (MQW) waveguide modulators, **Journal of Lightwave Technology**. Vol 6, No 6, pp 743-757, 1988.

WOOD, T.H., BURRUS, C.A., MILLER, D.A.B., CHEMLA, D.S., DAMEN, T.C., GOSSARD A.C. and EIEGMANN, W. 131 ps optical modulation in semiconductor multiple quantum wells (MQW's). **Journal of Quantum Electronics**. Vol QE-21, No 2, 1985.

WOOD C.E.C. et al. Complex free-carrier profile synthesis by atomic-plane" doping of MBE GaAs, **Journal Applied Physics**. Vol 51, p 383, 1980.

WOOD, T.H., PALASTALAN, J.Z., BURRUS, C.A., JOHNSON, B.C., MILLAR, B.I., DE MIGUEL, J.L., KOREN, U. e YOUNG, M.G. Electric field screening by photogenerated holes in multiple quantum well: A new mechanism for absorption saturation. **Applied Physics Letters**. Vol 57, p 1081. 1990.

WOODWARD, T.K., CUNNINGHAM, J.E. and JAN, W. Comparison of stepped -well and square-well multiple quantum well optical modulator. **Journal Applied Physics**. Vol 78, No 3, 1995.

WU, C.L. et al. Very strong negative differential resistance real-space transfer transistor using a multiple δ -doping GaAs/InGaAs pseudomorphic heterostructure. **Applied Physics Letters**. Vol 66, p 739, 1995.

YAVICH, B., SOUZA, P.L., PIRES, M.P., HENRIQUES, A. e GONÇALVES, L.C.D. Single and periodically Si delta doped InP grown by LP-MOVPE. **Semiconductor Science and Technology**. Vol 12, p 481. 1997

Apêndice A

PROGRAMA DE CAMPO PRÓXIMO

Labview é uma ferramenta usada no campo da instrumentação. Este *software* foi utilizado para desenvolver o programa que faz as varreduras de campo próximo em guias de onda.

Para executar o programa do campo próximo, o computador deve ter uma versão do *Labview* instalada. Por este motivo, um CD é anexado com uma versão simplificada do software (`\nf\Installer\disks\setup.exe`).

Para fazer a instalação proceda da seguinte maneira :

- Execute o arquivo *Setup.exe* localizado no CD no seguinte endereço: `\nf\Installer\disks\setup.exe` e reinicie o computador conforme é solicitado pelo *software*.
- Execute o arquivo *NF.exe* conforme mostrado na figura A1

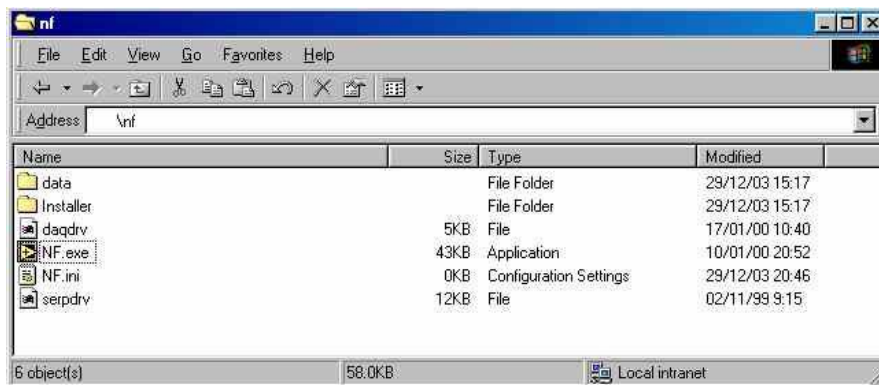


Figura A1 Janela para seleção do executável de campo próximo

- Abrir a biblioteca `nf\data\libraria nf.dll` e escolher o programa *Final nf.vi* mostrado na figura A2

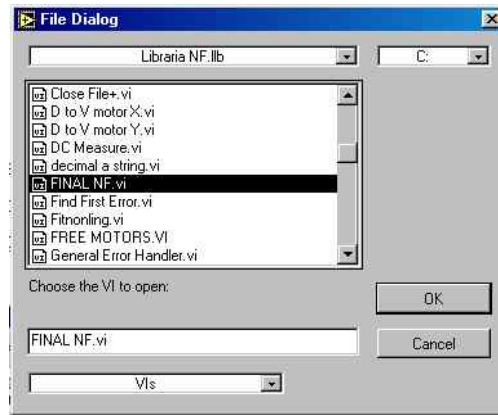


Figura A2 Janela para seleção do programa de campo próximo

- A Tela de interface com o usuário é apresentada na figura A3

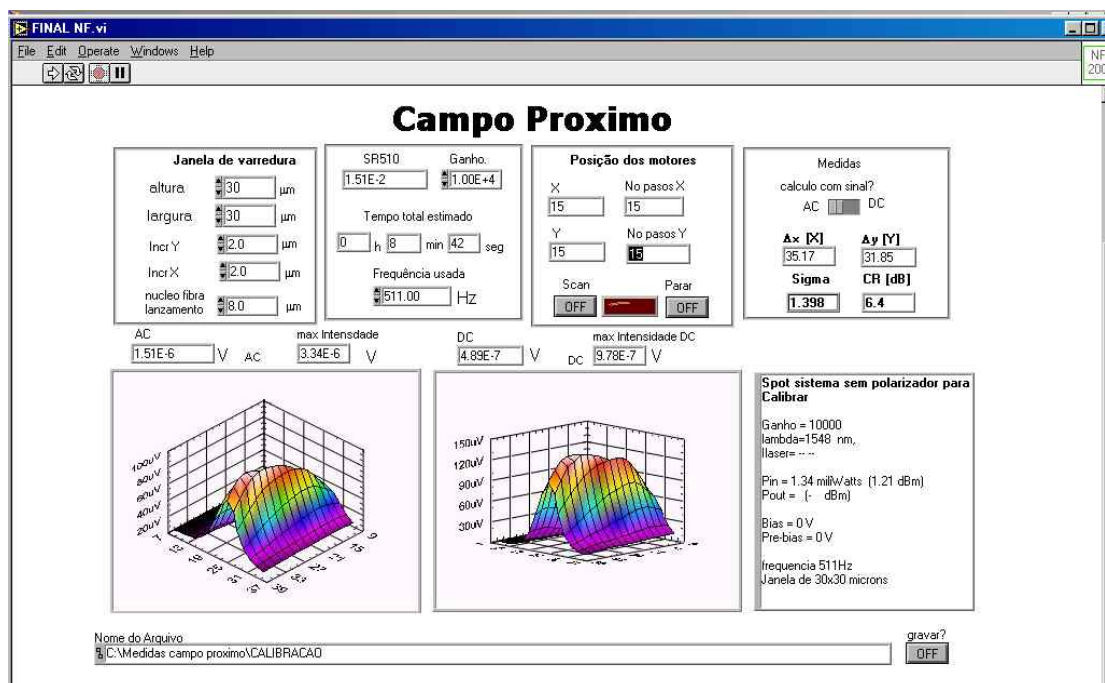


Figura A3 Tela de interface do software para o campo próximo.

A descrição da tela de controle

Janela de varredura : Nesta janela devem ser introduzidas as dimensões e o passo ou incremento da varredura. Os valores limites desta janela são de $36 \times 36 \mu\text{m}$ e um incremento mínimo de $0.1 \mu\text{m}$. O valor do *spot size* do feixe incidente depende do sistema óptico usado. Deve ser introduzido no controle nomeado como “núcleo da fibra de lançamento”. Este valor é importante para o posterior cálculo do fator de confinamento (Sigma).

Segunda Janela : Esta janela contém um visor para o valor da voltagem medida pelo *lock-in* (SR 510). O controle do ganho que está sendo usado. O visor do tempo total estimado para a varredura e o controle do valor da frequência usada na técnica *lock-in*.

Posição dos motores : Possui visores para registrar a posição dos motores e o número total de passos que devem ser executados. Há um controle para dar início à varredura, um *led* que acende enquanto está sendo feita a aquisição de dados, e um controle para parar o programa. Os controles de início da varredura (Scan) e o *led* permanecem ligados durante a varredura e se desligam automaticamente quando o processo finaliza. Quando o controle “Parar” é ativado, o processo é interrompido. Para reiniciar o programa basta selecionar a primeira seta que se encontra na parte superior esquerda na tela de operação (Figura A3).

Medidas : Nesta janela é calculado o fator de confinamento (Sigma), a largura do *spot size* nas direções X e Y e a razão de contraste. O sinal utilizado para fazer os cálculos mencionados pode ter origem num sinal modulado, adquirido via *lock-in* (sinal AC), ou num sinal direto adquirido através de uma placa de aquisição de dados (Sinal DC). O modelo do cálculo do fator de confinamento usado foi proposto por Inoue em *Low loss GaAs Optical Waveguides* publicado no *Journal of Lightwave Technology*, 1985.

Gráficos AC e DC : Quando a varredura é iniciada o gráfico dos sinais AC e DC são apresentados numa imagem 3D. Os níveis de tonalidade são automaticamente ajustados numa escala cujos valores mínimo e máximo são ajustados aos valores mínimo e máximo registrados durante a aquisição. Ao final da aquisição de dados, o gráfico muda para outra apresentação 3D, como é observado na Figura 3A. Os eixos X e Y correspondem às posições reais em microns da varredura. O eixo Z corresponde ao valor em Volts da intensidade medida pelo fotodetector. Acima dos gráficos encontram-se visores que registram a máxima intensidade detectada e a intensidade que está sendo medida no momento.

Janela de Observações Pode ser utilizada para escrever informações que o usuário possa precisar no futuro para possíveis classificações e análise dos dados. Tais informações serão salvas num arquivo .dat ao final da medida.

Nome dos arquivos : Deve ser escrito o nome do arquivo a ser salvo. Ao final do processo da medida, o programa produzirá 5 tipos de arquivos:

- Nome do arquivo.dat : Contém a matriz de valores do sinal AC.
- Nome do arquivo DC.dat : Contém a matriz de valores do sinal DC.
- Nome do arquivo VX.dat : Contém num vetor os valores das posições em X (em microns).
- Nome do arquivo VY.dat : Contém numa matriz os valores das posições em Y (em microns).
- Nome do arquivo observations.dat : Contém as informações introduzidas na Janela de observações.

Para fechar o programa deve ser ativado o quadro X do lado superior direito da tela do programa.

Apêndice B

PROGRAMA DE FOTOCORRENTE

Para que o programa de fotocorrente possa ser executado, uma versão de *Labview* deve estar instalada no computador (Vide início do Apêndice A). O programa de fotocorrente encontra-se no CD anexo a esta tese, dentro do diretório *fotocorrente paralelaMonocromador* com o nome de *Monocromador 74100gpiBUT 3.vi*. Deve ser feita uma cópia de todo o diretório deste programa em algum lugar do disco rígido. O monocromador deve ser ligado antes de executar o programa. O painel de controle do programa é apresentado na figura B1.

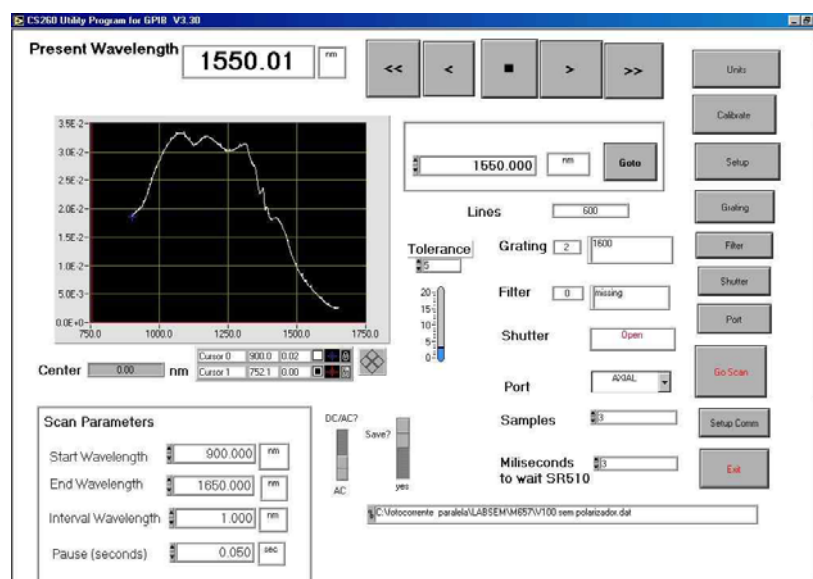


Figura B1 Tela de interface do software para a Fotocorrente

A janela possui: um visor que registra permanentemente o comprimento de onda do monocromador, botões de avanço e retrocesso, um controle para introduzir o comprimento de onda e um conjunto de botões para configuração do monocromador.

Botões de Configuração

- **Units** : Permite mudar a escala de medidas que pode ser microns ou nanômetros.

- **Calibrate** : Permite selecionar os valores característicos de cada rede de difração, mas é recomendável não mudá-los, pois eles estão calibrados.

- **Grating** : Permite a escolha da rede de difração. O monocromador usado no LabSem possui 3 tipos de rede de difração: *Grating 1* : Opera na faixa de 600 à 2500 nm , com comprimento de onda central em 1000 nm. A densidade de linhas é de 600 e tem um limite mecânico de 2800 nm. *Grating 2* : Opera na faixa de 900 à 2000 nm , com comprimento de onda central em 1600 nm, densidade de linhas de 600 e um limite mecânico de 2800 nm. *Grating 3* : Opera na faixa de 180 à 500 nm , com comprimento de onda central em 200 nm, densidade de linhas de 600 e um limite mecânico de 2800 nm.

- **Filter** : Permite a seleção dos filtros, caso sejam usados

- **Shutter** : Permite abrir ou fechar o shutter

- **Port** : Permite escolher a porta de saída da luz do monocromador, pois ele possui uma saída axial e outra lateral.

- **Setup Comm** : Permite a escolha do endereço GPIB.

- **Tolerance** : Margem estipulada dentro da qual os valores medidos são aceitos.

- **Samples** : Escolha do número de amostras para cada medida.

- **Milliseconds to wait** : Tempo de espera entre duas medidas.

- **DC/AC?** : O espectro de fotocorrente pode ser medido a partir do sinal AC detectado pelo *Lock-in*, ou a partir do sinal DC detectado pela placa DAQ

- **Save?** : Opção para gravar o arquivo do espectro de fotocorrente, esta opção somente grava ao final da varredura.

- **Scan parameters** : Controles que permitem introduzir os limites da faixa da varredura, o passo em comprimento de onda e o tempo que o programa deve esperar para que o monocromador mude cada passo.

Depois de serem escolhidos os valores desejados para a varredura, se inicia a operação ativando o botão *Go Scan*, com o qual se pode também parar a medida em qualquer instante. Ao finalizar a medida um arquivo em formato texto é salvo no endereço escrito no controle localizado na parte inferior da tela.

Apêndice C

BASES TEÓRICAS DO *BEAMPROP*

O principal objetivo do *software* é fornecer uma ferramenta de modelagem numérica para calcular a propagação de ondas da luz em guias de onda. O problema é complexo e várias hipóteses devem ser feitas inicialmente. Os cálculos do programa são feitos utilizando o método BPM (*beam propagation method*). o método utiliza a teoria das diferenças finitas para solucionar a equação parabólica *Helmholtz*.

Os problemas de propagação de um feixe requer de duas informações: A primeira é com relação ao índice de refração efetivo $n(x, y, z)$ e a segunda é a onda do campo incidente $u(x, y, z = 0)$.

Para solucionar o algoritmo, se requer informação da forma de parâmetros numéricos como são: O domínio finito computacional, o tamanho da malha transversal Δx e Δy e finalmente tamanho do *step* Δz propagando-se no guia. O *software* procura estimar valores apropriados para aqueles parâmetros, mas também permite ao usuário substituir ou trocar os valores inicialmente assinados. *BeamPROP* tem a capacidade de calcular modos não lineares na polarização, incorporando os efeitos por presença de eletrodos e aquecimento.

C.1.

Equação escalar, aproximação paraxial BPM.

O BPM faz uma aproximação da equação de onda a ondas monocromáticas. Calcula numericamente as equações resultantes com duas restrições: A primeira delas é um campo escalar, ou seja, sem considerar efeitos de polarização. A segunda é a paraxialidade, que significa uma propagação restrita à um intervalo de ângulos pequenos.

A expressão da equação de Helmholtz para o campo escalar para ondas monocromáticas é a seguinte:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k(x, y, z)^2 \phi = 0 \quad (\text{C.1.})$$

O campo elétrico escalar é escrito como

$$E(x, y, z, t) = \phi(x, y, z) e^{-i\omega t}, \quad (\text{C.2.})$$

onde $k(x, y, z) = k_0 n(x, y, z)$ é o número de onda e $k_0 = 2\pi / \lambda$ é o número de onda no vácuo.

A geometria do problema é definida completamente pelo índice de refração efetivo $n(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$. Quando a luz se propaga nos guias, é comum que se apresente uma pequena e lenta variação do campo ϕ e da fase, este fenômeno é chamado de *ansatz*. O campo pode então ser escrito da seguinte forma:

$$\phi(x, y, z) = u(x, y, z) e^{iz\bar{k}} \quad (\text{C.3})$$

Onde \bar{k} é uma constante numérica que representa a variação média da fase. Esta constante numérica é assumida como o número de onda de referência.

O número de onda é freqüentemente expressado em termos de índice de refração, \bar{n} , usando a expressão $\bar{k} = k_0 \bar{n}$. Usando as anteriores considerações, a equação de onda de *Helmutz*, a fica:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2i\bar{k} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2)u = 0 \quad (\text{C.4.})$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{i}{2\bar{k}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + u(k^2 - \bar{k}^2) \right) \quad (\text{C.5})$$

A equação C.5. representa a equação básica do **BPM** num espaço tridimensional. Para simplificar a um espaço bidimensional, não se considera a

dependência em função de y , desta forma se temos um campo de entrada $u(x,y,z=0)$, a expressão C.5 esta determinando a evolução do campo no espaço $z > 0$.

C.2.

Solução numérica e condições de contorno.

A equação C.5. é uma derivada parcial parabólica que pode ser integrada na direção z por diversas técnicas numéricas. No caso do BPM foi utilizado o método de *Fourier split-step*. O método está baseado numa aproximação de diferenças finitas (teoria de Crank-Nicholson). Na aproximação das diferenças finitas, o campo no plano transversal xy , é representado sobre pontos discretos numa malha e sobre planos discretos ao longo da direção de propagação longitudinal z . Dado um campo discretizado sobre um plano z o objetivo é obter a equação numérica que determine o campo sobre um próximo plano z . Este processo de propagação elementar é repetido para determinar o campo através da estrutura.

Seja o campo u_i^n , com i pontos na malha transversal e com plano longitudinal n , se supor que os pontos da malha e os planos estão igualmente espaçados por Δx e Δz , usando o método de Crank-Nicholson a equação que representa um semi-plano entre um plano conhecido n e um desconhecido $n+1$ e dada por:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta z} = \frac{i}{2k} \left(\frac{\delta^2}{\Delta x^2} + (k(x_i, z_{n+1/2}))^2 - \overline{k^2} \right) \frac{u_i^{n+1} + u_i^n}{2} \quad (\text{C.6.})$$

onde δ^2 é um operador diferencial de segunda ordem $\delta^2 u_i = (u_{i+1} + u_{i-1} - 2u_i)$ e $z_{n+1/2} \equiv z_n + \Delta z / 2$.

Manipulando matematicamente esta expressão, ficará em forma de uma equação matricial tri-diagonal para um campo desconhecido u_i^{n+1} em termos de quantidades conhecidas obtemos:

$$a_i u_{i-1}^{n+1} + b_i u_i^{n+1} + c_i u_{i+1}^{n+1} = d_i \quad (\text{C.7.})$$

Os valores para os coeficientes são obtidos na referencia [Scarmozzino, 1991]. A forma tri-diagonal da equação anterior permite uma rápida solução da ordem $O(N)$, onde N , corresponde ao número de pontos na malha em x ,

Devido ao campo ser representado por um domínio computacional finito, os valores extremos, ou seja, os pontos $i = 1$ e $i = N$, viram quantidades desconhecidas fora do domínio. Para estes pontos a equação C.7. deve ser substituída por apropriadas condições de contorno que permita completar o sistema de equações.

Uma condição comumente usada é conhecida como condição de contorno transparente *TBC* e consiste em assumir que próximo do contorno, o campo se comporta como uma onda plana. Assumir a onda como plana permite que os pontos do contorno do campo estejam relacionados com pontos interiores adjacentes, completando assim um conjunto de equações para solucionar o problema [Hadley, 1991]. A TBC é geralmente muito efetiva em deixar que a radiação escape livremente do domínio computacional, não entanto há problemas nos quais a performance não é muito boa.[Vassalo,1996]

C.3.

Polarização *BPM*

Efeitos da polarização podem ser considerados na aproximação *BPM*. Neste caso, o campo elétrico \mathbf{E} é representado de forma vetorial e se usa a forma vetorial da equação de onda de *Helmholtz*:

$$\frac{\partial u_x}{\partial z} = A_{xx}u_x + A_{xy}u_y \quad (\text{C.8})$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial z} = A_{yx}u_x + A_{yy}u_y \quad (\text{C.9.})$$

onde A_{ij} são derivadas de operadores complexos.

$$A_{xx}u_x = \frac{i}{2k} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial x} (n^2 u_x) \right] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} u_x + u_x (k^2 - \overline{k^2}) \right)$$

$$\begin{aligned}
 A_{yy}u_y &= \frac{i}{2k} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} u_y + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial y} (n^2 u_y) \right] + u_y (k^2 - \overline{k^2}) \right) \\
 A_{yx}u_x &= \frac{i}{2k} \left(\frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial x} (n^2 u_x) \right] - \frac{\partial}{\partial y \partial x} u_x \right) \\
 A_{xy}u_y &= \frac{i}{2k} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial x} (n^2 u_y) \right] - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} u_y \right)
 \end{aligned} \tag{C.10}$$

Os operadores A_{xx} e A_{yy} consideram a dependência da polarização devido as diferentes condições de contorno sobre a interface e descreve estes efeitos como:

- As constantes de propagação.
- A forma dos campos.
- As perdas por acoplamento para campos TE e TM.

Os termos não diagonais de A_{xy} e A_{yx} consideram os modos híbridos e o acople da polarização devidos a efeitos geométricos, como por exemplo influencia das bordas ou a inclinação nas paredes na seção transversal da estrutura.

C.4.

Remoção do critério paraxial - uso de ângulos maiores em *BPM*

A idéia principal das muitas aproximações é reduzir a limitação paraxial devido ao efeito da parcela $\partial^2 u / \partial z^2$ que não foi considerado na derivada da *BPM*. As diferentes aproximações variam dependendo do método utilizado e do grau de aproximação; o mais conhecido é a técnica *Multistep Padé* baseada no wide-angle.

Ela consiste em aproximar a derivada da equação para *wide-angle BPM*. Considera a equação de onda de *Helmholtz* em termos do campo de variação lenta (equação C3). Se define $D = \partial / \partial z$ como um operador diferencial

($D^2 = \partial^2 u / \partial z^2$). A equação pode ser vista como uma equação quadrática, que dever ser solucionada para D :

$$\frac{\partial u}{\partial z} = i\bar{k}(\sqrt{1+P} - 1)u \quad (\text{C.11})$$

$$\text{onde } P \equiv \frac{1}{k^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2) \right)$$

A expressão C.11 refere-se a uma equação de onda unidirecional onde a derivada de primeira ordem representa ondas viajando numa única direção. A equação C.11 é exata, nenhuma aproximação paraxial tem sido usada. Uma consideração de interesse nesta expressão consiste em avaliar o operador diferencial P , antes de resolver a integral. Para solucionar esta dificuldade recomenda-se utilizar uma aproximação em serie de Taylor ou de Padé. A tabela C.1, mostra várias formas de aproximação. Uma aproximação via Pade é mais exata.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = i\bar{k} \frac{N_m(P)}{D_n(P)} u \quad (\text{C.12})$$

Padé Order (m,n)	N_m	D_n
(1,0)	$P/2$	1
(1,1)	$P/2$	$1+P/4$
(2,2)	$P/2+P^2/4$	$1+3P/4+P^2/16$

Tabela C.1. Termos para aproximação *Padé*

Quando a equação C.12 é utilizada com grandes ângulos, maiores índices de contraste e modos de interferência mais complexos podem ser analisados tanto em guias de onda como em problemas no espaço livre. Uma informação mais ampla relacionada a estes tópicos podem ser discutidos na referencia [Ilic, 1996].