

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE APOIO A PESQUISA
PROGRAMA INSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

ESTUDOS DAS PROPRIEDADES ÓPTICAS DE UM ESPELHO DO TIPO DBR EM
MICROCAVIDADES SEMICONDUTORAS

Bolsista: Vilmara da Paixão de Sousa Barbosa

MANAUS

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE APOIO A PESQUISA
PROGRAMA INSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO FINAL

PIB – E - 0007/2009

ESTUDOS DAS PROPRIEDADES ÓPTICAS DE UM ESPELHO DO TIPO DBR EM
MICROCAVIDADES SEMICONDUTORAS

Bolsista: Vilmara da Paixão de Sousa Barbosa

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Adriano Cotta

MANAUS

2010

Resumo

Este trabalho tem por objetivo introduzir conceitos fundamentais de óptica não-linear através do estudo de microcavidades semicondutoras. Os estudos se baseiam no desenvolvimento teórico de uma heteroestrutura semicondutora, analisando a interferência de múltiplos feixes nas diversas interfaces que compõem o espelho DBR (*Distributed Bragg Reflector*). Esta análise prevê a inclusão da dispersão e absorção dos materiais que compõem o espelho, descrevendo adequadamente a amostra em estudo. Após a adequada caracterização dos espelhos será desenvolvida uma cavidade óptica na qual defeitos de eletrodinâmica quântica de cavidades poderão ser exploradas.

Microcavidades semicondutoras são cavidades ópticas com dimensões da ordem do comprimento de onda da luz formadas por dois espelhos do tipo DBR. Estes espelhos são constituídos com dois materiais de índice de refração diferentes, cujo par é repetido várias vezes formando uma heteroestrutura.

A construção da estrutura nos permite desenvolver estudos de óptica com diversas aplicações: desenvolvimento de um laser sem inversão de população, bi-estabilidade óptica, chaveamento opto-eletrônico, estudo de condensados de Bose-Einstein de polaritons confinados, conversão paramétrica, entre outros.

Lista de Figuras

Estrutura de em Espelho DBR	07
Camada dieltrica para uma polariação TE	10

Sumário

1. Introdução -----	06
2. Revisão Bibliográfica -----	07
3. Métodos Utilizados -----	09
4. Resultados e Discussões -----	10
5. Conclusão -----	15
6. Referências -----	16
7. Cronograma -----	17

Introdução

Microcavidades ópticas limitam a luz em volumes pequenos através de recirculação ressonante. Em dispositivos ópticos quânticos, as microcavidades podem fazer os átomos ou pontos quânticos a emitir fótons espontâneos em uma direção desejada ou podem prover um ambiente onde mecanismos dissipativos, tais como emissão espontânea, são superados de forma que o emanhamento quântico da radiação e matéria seja possível. Aplicações destes dispositivos notáveis são tão diversas quanto às propriedades geométricas e ressonantes deles. A microcavidade é uma forte ferramenta para a nanotecnologia, por assim dizer.

Como exemplos têm o processo de microtexturização, que é um trabalho que consiste no desenvolvimento de um dispositivo projetado para texturizar de forma regular micro-métrica, as superfícies internas de peças cilíndricas. Geralmente usado na Engenharia Mecânica. O processo de microtexturização consiste na geração de microcavidades em superfícies de contato de componentes móveis, que atuam como reservatórios de lubrificante e armadilhas para resíduos particulados, reduzindo de forma significativa o coeficiente de atrito e o desgaste dos componentes.

O que nos leva a ver que podemos aplicar as microcavidades em diferentes ramos, de acordo com o interesse. No nosso trabalho introduzimos conceitos fundamentais de óptica não-linear através do estudo de microcavidades semicondutoras. Os estudos se baseiam no desenvolvimento teórico de uma heteroestrutura semicondutora, analisando a interferência de múltiplos feixes nas diversas interfaces que compõem o espelho DBR (*Distributed Bragg Reflector*).

A proposta principal é o estudo do comportamento espectral dos espelhos DBR para a construção de uma microcavidade óptica.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Espelhos DBR

Os espelhos DBR são formados por pares de camadas alternadas de materiais semicondutores diferentes, conseqüentemente com índice de refração diferentes. No nosso trabalho utilizamos a liga de Arseneto de Gálio (GaAs) com Alumínio (Al) de forma que a estrutura do nosso espelho estar representada na figura 1. Mas, pode ser usado qualquer material semicondutor conforme já foi dito.

Essa estrutura permite construir espelhos dielétricos de altíssima refletividade. Enquanto espelhos comuns refletem 85% da luz inserida, os espelhos DBR refletem 99,9%, ou seja, um índice muito baixo de perda. Por isso ele é bastante utilizado na Óptica de raios lasers. Temos como exemplo: aparelhos de DVD, impressoras a laser e na transmissão por fibra óptica.

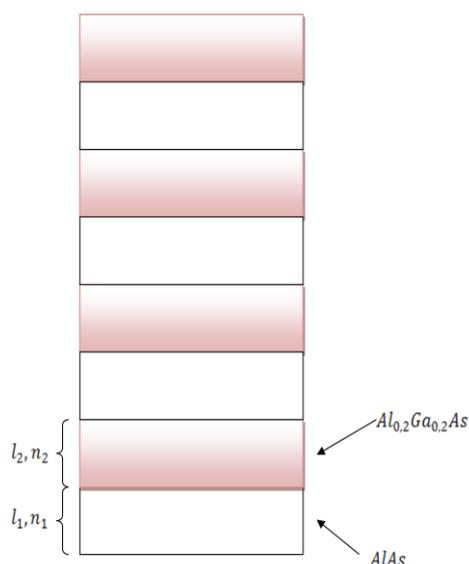


Fig. 1. Estrutura do espelho DBR usado no trabalho.

Em geral os espelhos DBR são do tipo planares e crescidos pela técnica de BEM (*Molecular Beam Epitaxy*), o que nos permite obter uma estrutura com alta refletividade, proporcionando um alto fator de qualidade para uma cavidade formada por estes espelhos, apresentando um aumento no tempo de vida do fóton confinado, e conseqüentemente, na eficiência do processo de emissão laser.

2.2. Propagação de ondas eletromagnéticas em meio periódicos

Um meio periódico simples consiste de dois materiais com índice de refração diferentes, que pode ser descrito por:

$$n = \begin{cases} n_2 & 0 < z < l \\ n_1 & l < z < \gamma \end{cases} \quad (1)$$

onde n é o índice de refração, z é o eixo de crescimento do material, e γ indica periodicidade.

Como estamos tratando de um meio periódico, temos que a propagação de uma radiação laser monocromática é descrita pelas equações de Maxwell:

$$\left. \begin{aligned} \vec{\nabla} \times \vec{H} &= i\omega\epsilon\vec{E} \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= i\omega\epsilon\vec{H} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Cuja solução é o Teorema de Bloch:

$$\left. \begin{aligned} \vec{E}_k(z) &= \vec{E}_k(z)e^{i(\vec{k}\cdot\vec{z}-\omega t)} \\ \vec{H}_k(z) &= \vec{H}_k(z)e^{i(\vec{k}\cdot\vec{z}-\omega t)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

onde k é o vetor de onda de Bloch, que mostra a dependência dos campos em relação a esta variável. Podemos verificar isso através das equações de Maxwell:

$$\nabla_x \vec{E} = -\mu_o \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (4) \quad \nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (5)$$

$$\nabla_x \vec{H} = \epsilon_o \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (6) \quad \nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (7)$$

Resolvendo (4):

$$\nabla_x \vec{E} = -\mu_o H_o i\omega e^{i(\vec{k}\cdot\vec{z}-\omega t)}$$

mas,

$$\vec{H} = H_o e^{i(\vec{k}\cdot\vec{z}-\omega t)}$$

logo:

$$\nabla_x \vec{E} = -\mu_o i\omega \vec{H}.$$

Que o rotacional para o campo elétrico.

3. Métodos utilizados

O primeiro passo para realização do projeto, consistiu em levantamento bibliográfico através de pesquisas em livros, artigos, internet e trabalhos de outros colegas. As pesquisas tinham como ponto principal microcavidades, espelhos DBR, matriz transferência, refletores, eletrodinâmica, estado sólido, entre outros.

Incluindo estudo dirigido de Física do Estado Sólido, aulas de Óptica Física e Heteroestrutura Quântica, que são disciplinas do programa de pós-graduação. Ministradas pelo orientador.

Para realização da simulação, utilizamos primeiramente o programa Matlab 6.5 para o cálculo da reflectância. Depois utilizamos o Origin 7.0, para colher dados para fazer o mesmo programa, utilizando agora a equação de Sellmeier1:

$$n^2 = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} \quad (8)$$

4. Resultados e discussões

Para descrever o sistema utilizamos uma camada dielétrica (figura 2), posteriormente generalizando para as outras camadas.

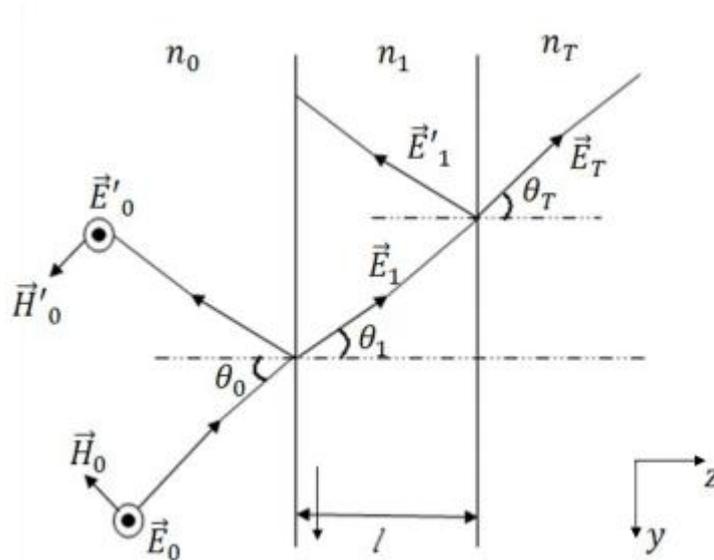


Fig. 2. Orientação dos campos para o caso de incidência oblíqua em uma única camada dielétrica para uma radiação com polarização TE (paralelo a interface).

Através da figura 2, podemos obter as relações nas seguintes tabelas:

<p><i>Campo elétrico:</i> $\vec{E}_o + \vec{E}'_o = \vec{E}_1$</p> <p><i>Campo magnético:</i> $(-\vec{H}_o + \vec{H}'_o)\cos\theta_o$ $= (\vec{H}_1 + \vec{H}'_1)\cos\theta_1$</p> <p>ou $(-\vec{E}_o + \vec{E}'_o)\cos\theta_o = (\vec{E}_1 + \vec{E}'_1)\cos\theta_1$</p>	Primeira Interface
<p><i>campo elétrico:</i> $\vec{E}_1 e^{ikl} + \vec{E}'_1 e^{-ikl} = \vec{E}_T$</p> <p><i>Campo magnético:</i> $(-\vec{H}_1 e^{ikl} + \vec{H}'_1 e^{-ikl})\cos\theta_1$ $= \vec{H}_T \cos\theta_T$</p> <p>ou $(-\vec{E}_1 e^{ikl} + \vec{E}'_1 e^{-ikl})\cos\theta_1 = \vec{E}_T \cos\theta_T$</p>	Segunda Interface

Tabela 1. Equações de continuidade para os Campos Elétrico e Magnético.

Tornando claro que estamos utilizando Polarização Transversa, onde o campo é paralelo ao eixo de crescimento, ou seja, é perpendicular ao plano xy.

As transformações das equações de continuidade (tabela 1) de campo elétrico para magnético pode ser feito através da relação:

$$\vec{H} = \frac{n_o \vec{E}_o}{z_o} \quad (8)$$

onde Z_o é a impedância no vácuo.

$$z_o = \sqrt{\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}} \quad (9)$$

Ainda utilizando os dados da tabela 1, podemos chegamos a matriz transferência :

Matriz transferência

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{cc} \cos\delta & -\frac{i}{p} \operatorname{sen}\delta \\ -ip \operatorname{sen}\delta & \cos\delta \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} 1 \\ n_T \cos\theta_T \end{array} \right] \frac{E_T}{E_o} \quad \leftarrow \text{Coeficiente de Transmissividade} \\ & = \left[\begin{array}{c} 1 \\ n_o \cos\theta_o \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} 1 \\ -n_o \cos\theta_o \end{array} \right] \frac{E'_o}{E_o} \quad \leftarrow \text{Coeficiente de Refletividade} \end{aligned} \quad (10)$$

Que é utilizada no programa Matlab 6.5, para obtermos os gráficos para reflectância:

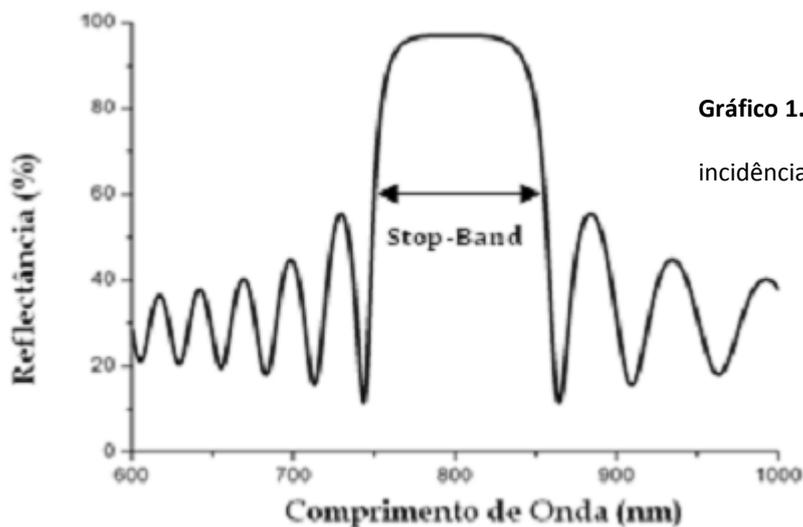


Gráfico 1. Curvas de reflectância para incidência normal.

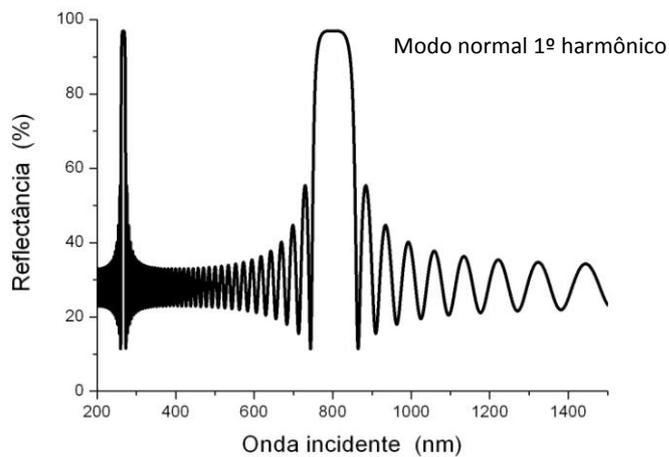


Gráfico 2. Curvas de reflectância para incidência normal com dois picos de reflectância.

De modo que a espessura de cada camada varia de acordo com:

$$l = \frac{\lambda_o}{4n} \quad (11)$$

Onde λ_o é o comprimento de onda no vácuo. Utilizamos 800nm, por ser o pico de emissão do GaAs, que é nosso meio de ganho. Como observado no gráfico 2, temos diversos picos de reflectância.

Ao inserir a microcavidade podemos ver observar que o pico se divide em dois (gráfico 3). Ou seja, a microcavidade ficou entre dez pares de camada.

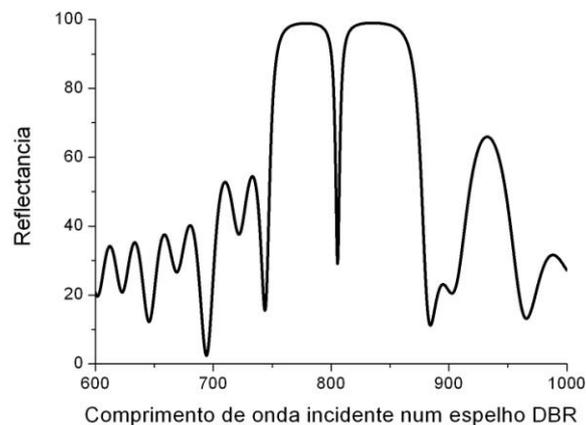


Gráfico 3. Curvas de incidência normal de uma cavidade formada por espelhos DBR.

A seguir podemos observar três dos gráficos obtidos pelo programa origin 7.0, para obter valores de A, B e C da equação de Sellmeier1 (eq. 8):

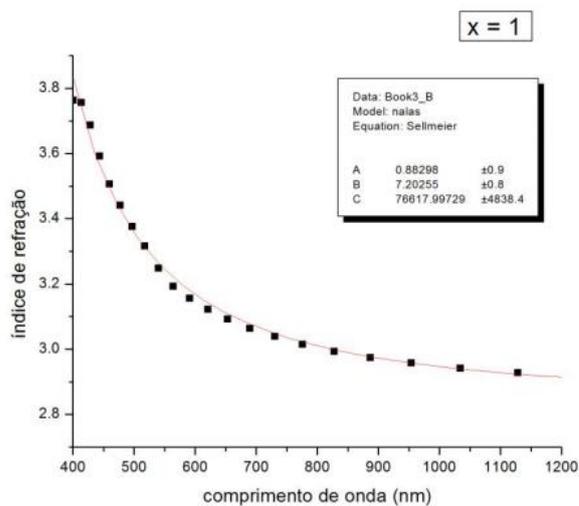


Gráfico 4. Comprimento de onda versus índice de refração, para concentração $x=1$.

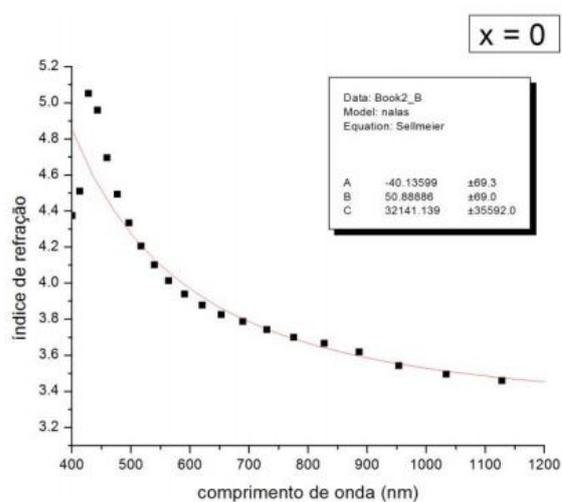


Gráfico 5. Comprimento de onda versus índice de refração, para concentração $x=0$.

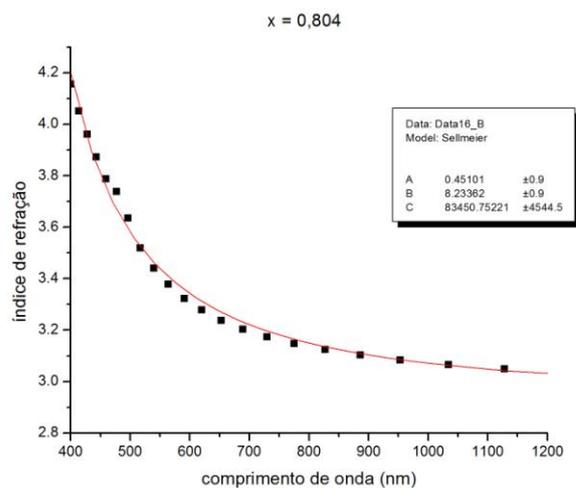


Gráfico 6. Comprimento de onda versus índice de refração, para concentração $x=0$.

Com os valores de A, B e C podemos encontrar uma função de $n(\lambda, x)$, obtendo os valores $A(x)$, $B(x)$ e $C(x)$, através dos gráficos 7, 8 e 9:

$$n^2(\lambda, x) = (-42,914 + 305,6867x - 750,32984x^2 + 730,52351x^3 - 230,969198x^4) + ((58,86986 - 397,80038x + 1266,74872x^2 - 2000,60455x^3 + 1616,36881x^4 - 551,96555x^5)\lambda^2)/(\lambda^2 - (29552,91412 + 147321,50966x + 710184,954655x^2 - 2,44116 \cdot 10^6x^3 + 1,79687 \cdot 10^6x^4))$$

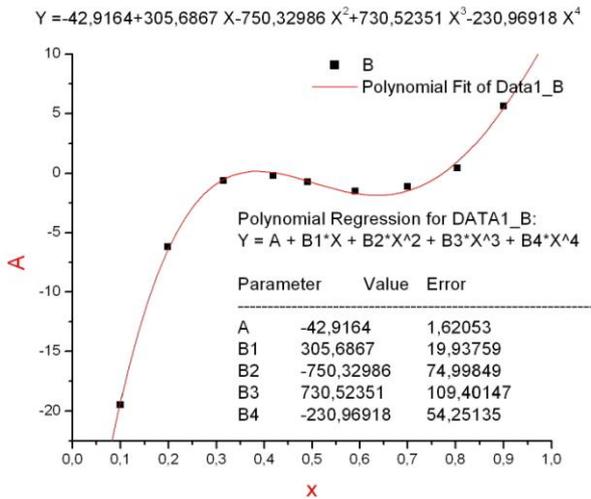


Gráfico 7. Gráfico de A variando com os valores da concentração x.

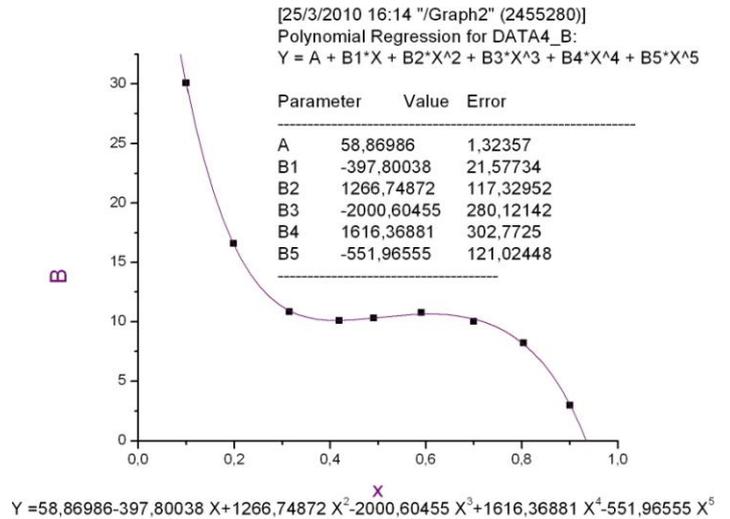


Gráfico 8. Gráfico de B variando com os valores da concentração x.

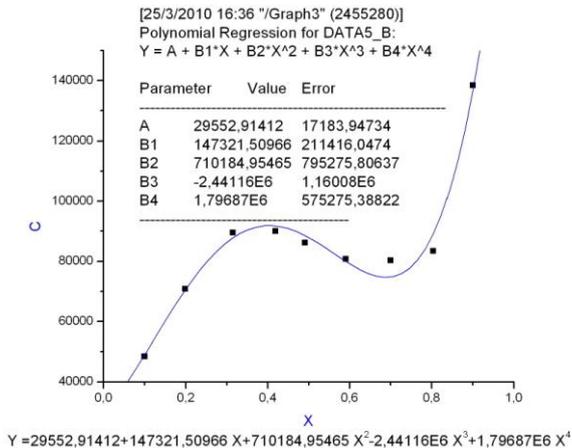


Gráfico 9. Gráfico de C variando com os valores da concentração x.

Com os valores obtidos nos gráficos do índice de refração *versus* comprimento de onda, podemos montar o algoritmo usando os valores de A, B e C para Sellmeier1:

$$n_{AlGaAs2} = \sqrt{-6.17323 + (16.61314 * (\text{LambR})^2) / ((\text{LambR})^2 - 70783.68557)};$$

$$n_{GaAs} = \sqrt{-40.13599 + (50.88886 * (\text{LambR})^2) / ((\text{LambR})^2 - 32141.139)};$$

$$n_{AlAs} = \sqrt{0.88298 + (7.20255 * (\text{LambR})^2) / ((\text{LambR})^2 - 76617.99729)};$$

$$n_{AlGaAs3} = \sqrt{-0.62538 + (10.85482 * (\text{LambR})^2) / ((\text{LambR})^2 - 89590.60175)};$$

5. Conclusão

Neste trabalho apresentamos um estudo das propriedades ópticas da microcavidade semicondutora planar. Seu desenvolvimento está associado ao trabalho de Mestrado do Prof. Eduardo Cotta (orientador desse projeto).

Apesar das dificuldades com os programas podemos concluir com êxito e os resultados obtidos estão de acordo com os previstos na literatura. Estando em falta apenas a parte de absorção.

Se mudássemos o número de camadas dos espelhos obteríamos resultados diferentes: se mudássemos pra mais teríamos melhor reflectividade, se mudássemos pra menos uma baixa reflectividade.

6. Referencias Bibliográficas

- COTTA, Eduardo Adriano. “Estudos de Efeitos Eletrodinâmicos numa Microcavidade Semicondutora com um Poço Quântico (SQW) de GaAs”. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: 2004
- FOWLES, Grant R. “*Modern Optics*”. Second Edition. 2ª ed. New York:1975.
- HUANG, Michael. At All. “*A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwavelength grating*”. Fevereiro 2007 Vol.: Volume 1 No 2 - pp119 – 122.
- ROMA, Paula Magda da Silva. “Estudo de formação de Exciton-Polariton em Regime de Acoplamento Forte em Microcavidades Semicondutoras”. Dissertação de Mestrado. Manaus: 2010.

7. Cronograma

BIMESTRE	ATIVIDADE
Agosto – Setembro/2009	Análise da literatura sobre o assunto
Outubro – Novembro/2009	Elaboração da simulação computacional para espelho DBR.
Dezembro/2009 – Janeiro/2010	Inclusão da dispersão e absorção dos materiais que constituem o espelho DBR na simulação.
Fevereiro – Março/2010	Inclusão da cavidade óptica na simulação numérica.
Junho - Julho/2010	Realização das medidas experimentais de refletividade da microcavidade e comparação com os resultados teóricos.