

## 5 Resultados Finais

Neste capítulo apresentaremos a montagem experimental, mostrando cada passo envolvido na sua realização. Será discutido o funcionamento de cada um dos dispositivos ópticos usados. Ao final, apresentaremos em detalhes todos os resultados experimentais obtidos com essa configuração de laser a fibra.

### 5.1 Montagem Experimental

A figura 5.1 mostra o esquema experimental do laser a fibra de cavidades acopladas usado nesse trabalho. A fibra dopada foi fixada sobre uma placa metálica, permitindo uma maior estabilidade térmica e mecânica do sistema.

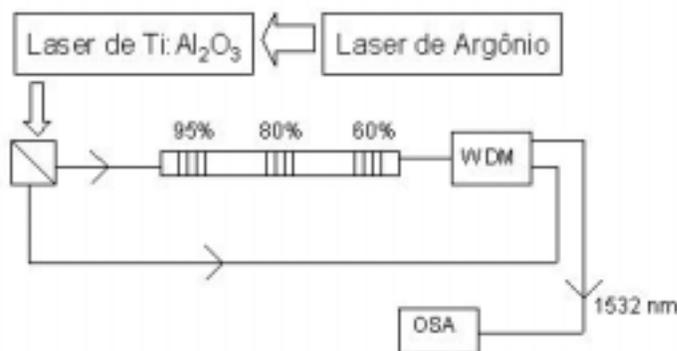


Figura 5.1: Esquema experimental do laser utilizado.

A fibra dopada com érbio foi alimentada no comprimento de onda de  $980\text{ nm}$  por um laser de Titânio-Safira ( $Ti : Al_2O_3$ ) que, por sua vez, era bombeado por um laser de Argônio. O laser de Argônio foi o *Coherent INNOVA® Sabre™ R Series Ion Laser*, que operava em  $470\text{ nm}$  e com potência de  $12\text{ W}$ . O laser de  $Ti : Al_2O_3$  foi o *Coherent Mira Model 900-B Laser*. O WDM, usado para separar os comprimentos de onda de  $980\text{ nm}$  e  $1532\text{ nm}$  foi da *Newport* (número de série N30347), com fibra do tipo SMB-D0980B. O Analisador de Espectro Óptico (OSA), utilizado para fazer os

espectros desse trabalho, era *ANDO AQ-6315A*.

As fibras dopadas com érbio foram doadas pelo Instituto de Pesquisa da ACREO/Suécia. As redes usadas neste trabalho têm reflectividades de 60%, 80% e 95%, e foram gravadas no Laboratório de Sensores a Fibra Óptica, do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Essas redes foram fabricadas utilizando-se o quarto harmônico de um laser de Nd:YAG *New Wave Research - Tempest* de comprimento de onda  $\lambda_{uv} = 266 \text{ nm}$ .

As cavidades acopladas foram fabricadas através da gravação de redes de Bragg, conforme mostrado na figura 5.1. As redes foram gravadas na mesma fibra, ou seja, na fibra dopada com érbio e, portanto, consideramos que as cavidades têm o mesmo índice de refração. O princípio básico de operação do laser de cavidades acopladas foi descrito na seção 3.3.1.

## 5.2 Resultados Experimentais e Discussão

Paralelamente a esse trabalho, foram analisadas também fibras com érbio e itérbio, numa configuração Fabry-Perot. Elas apresentavam concentrações de  $0,2 \text{ mol}\%$  de  $Yb^{3+}$  e de  $0,05 \text{ mol}\%$  de  $Er^{3+}$ . No entanto, estas fibras não se mostraram adequadas às condições experimentais existentes, apresentando uma baixa potência da emissão laser [47]. A figura 5.2 mostra o espectro de emissão desse laser a fibra co-dopada.

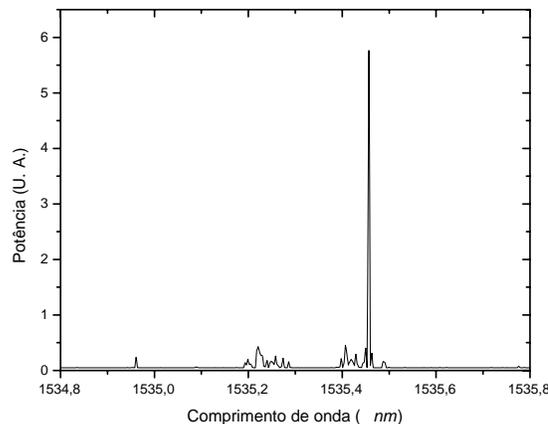


Figura 5.2: Laser a fibra dopada com  $Er^{3+}$  e  $Yb^{3+}$ . Espectro laser de uma cavidade única.

Para realizar a montagem do laser a fibra de cavidades acopladas, fizemos primeiramente a caracterização da fibra dopada com o elemento érbio. Na figura 5.3, mostramos o espectro de luminescência de um pedaço de  $30 \text{ cm}$  dessa fibra, quando bombeada pelo laser de Titânio-Safira emitindo em  $980 \text{ nm}$ .

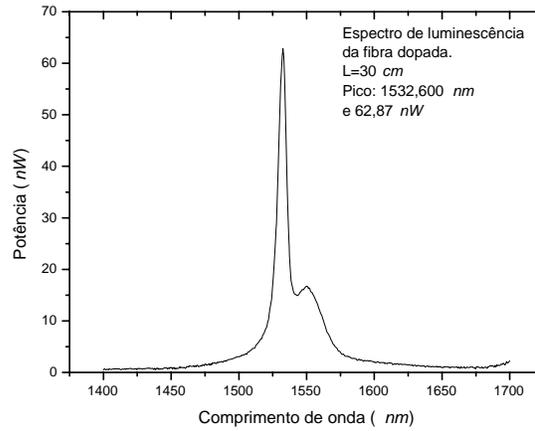


Figura 5.3: Espectro de luminescência de 30 cm de fibra dopada.

Observamos que o pico de emissão do  $Er^{3+}$ , contido na matriz de sílica que compõe o núcleo da fibra, quando excitado com  $980\text{ nm}$ , está em  $(1532,600 \pm 0,05)\text{ nm}$ . É justamente esse comprimento de onda de emissão ( $1532\text{ nm}$ ) que deverá ser refletido pelas redes do laser.

De forma a otimizar o processo de gravação das redes de Bragg, as fibras (dopadas também com germânio, que aumenta a fotossensibilidade) foram hidrogenadas a uma pressão de  $150\text{ atm}$  durante, aproximadamente, sete dias.

Na figura 5.4, temos o espectro de absorção do mesmo pedaço de fibra usado para o gráfico anterior.

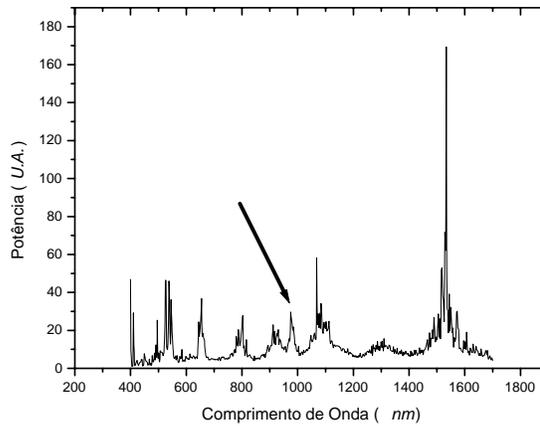


Figura 5.4: Espectro de absorção de 30 cm de fibra dopada.

Foi escolhido o comprimento de 30 cm para a realização dos gráficos mostrados nas figuras 5.3 e 5.4 porque esse comprimento corresponde ao comprimento de cada cavidade do laser. A seta indica o pico de absorção em 980 nm. Esse gráfico foi obtido através de medidas de transmissão utilizando-se o analisador de espectro óptico (OSA).

Durante o processo de gravação, a reflectividade das redes foi centrada em 1533 nm. Esse valor da reflectividade central diminui após alguns dias com a desidrogenação da fibra. Além disso, enquanto a rede é gravada, a fibra permanece tensionada e, ao ser liberada, o valor acima também diminui. As figuras 5.5 e 5.6 mostram os espectros de transmissão das redes de 60% e de 80%, respectivamente.

Na figura 5.6, podemos observar a presença de um segundo vale à direita. Ele está relacionado com o da primeira rede, de 60%, que foi crescida anteriormente. Enquanto a transmissão da rede de 80% era monitorada, uma tensão mecânica era aplicada sobre a rede de 60%, ao longo do eixo da fibra, para alterar seu comprimento de onda de reflexão. Isso permitia que a luz, de comprimento de onda centrado em 1532 nm, transmitida através da rede de 80%, não fosse refletida pela rede de 60%, atrapalhando o monitoramento.

Para a realização desses gráficos, foi usado o espectro ASE (*Amplified Spontaneous Emission* ou Emissão Espontânea Amplificada) de um EDFA. A largura de linha era de 1520 – 1620 nm. A figura 5.7 mostra o espectro dessa fonte ASE.

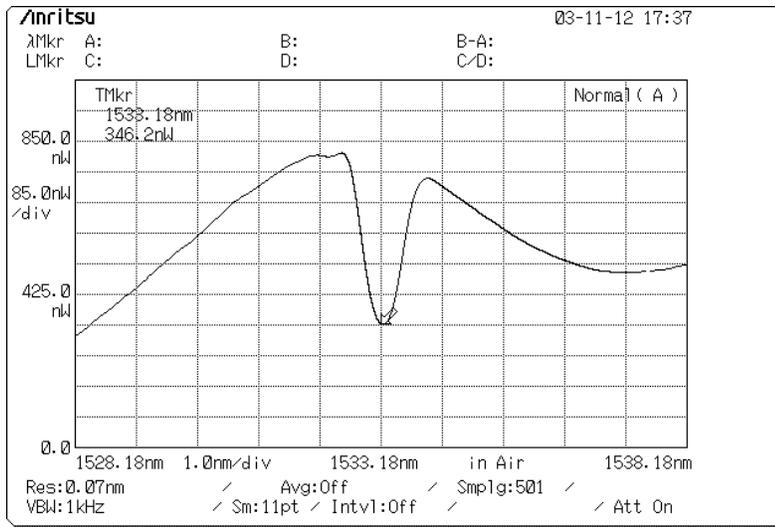


Figura 5.5: Espectro de transmissão da rede de Bragg de 60%.

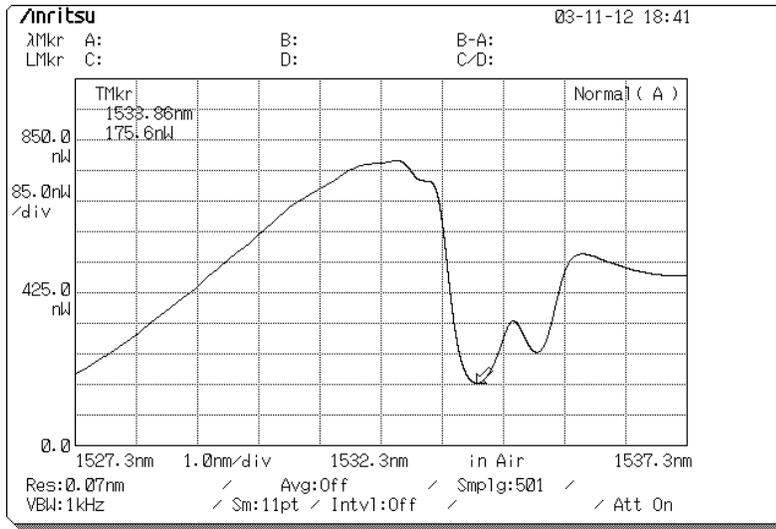


Figura 5.6: Espectro de transmissão da rede de Bragg de 80%.

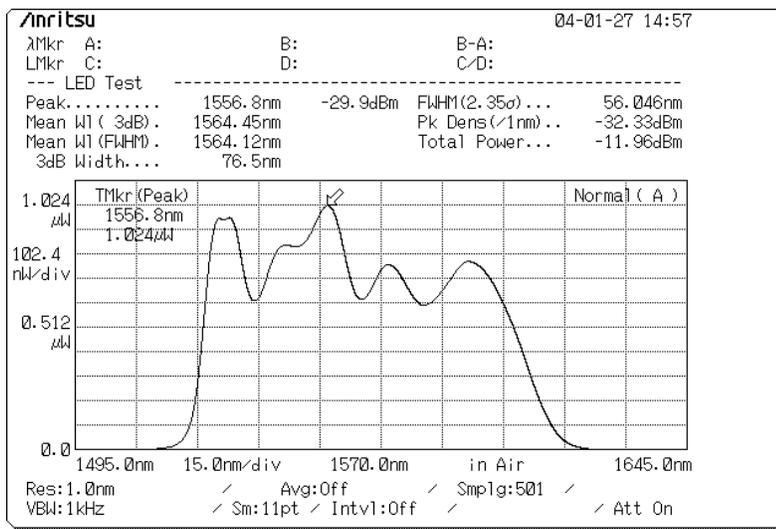


Figura 5.7: Espectro de emissão da fonte ASE.

O método usado para monitorar o crescimento das redes de 80% e de 60%, ou seja, controlar as reflectividades de cada uma ao longo do processo de fabricação, está mostrado na figura 5.8.

Enquanto a rede é gravada na fibra, o espectro ASE (ver fig. 5.7) é propagado ao longo dela e captado pelo OSA. À medida que a reflectividade da rede aumenta, diminui a quantidade de luz, do comprimento de onda

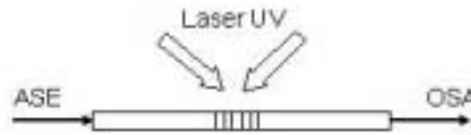


Figura 5.8: Monitoramento por transmissão.

central da rede, que chega até o OSA. Com isso, há a formação dos vales vistos nas figuras 5.5 e 5.6.

O gráfico que aparece na figura 5.9 mostra o espectro de reflexão da rede de 100% de reflectividade.

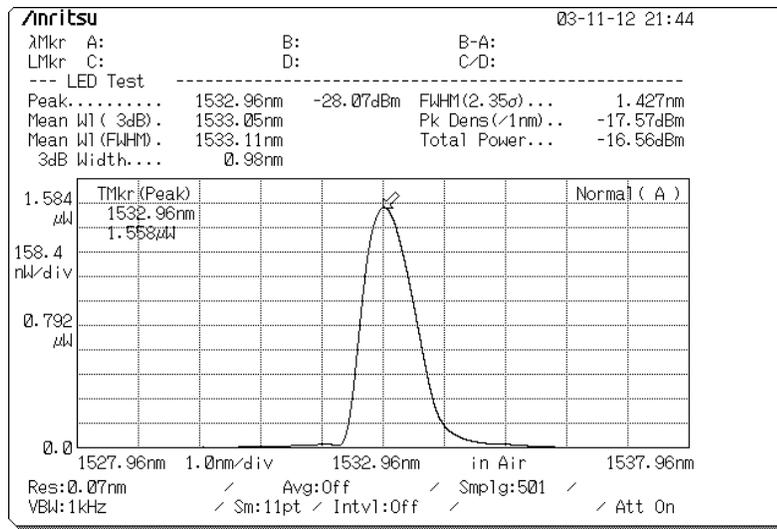


Figura 5.9: Espectro de reflexão da rede de Bragg de 100%.

Para gravar a rede de 100%, usamos um método um pouco diferente para monitorar o crescimento, pois as duas outras redes, já gravadas, atrapalhavam a medida do espectro de transmissão.

Ao invés de usar a transmissão, usamos a reflexão, isto é, monitoramos a parte do espectro ASE que era refletida pela rede. Isso está mostrado na figura 5.10. Assim, obtivemos o pico mostrado na figura 5.9.

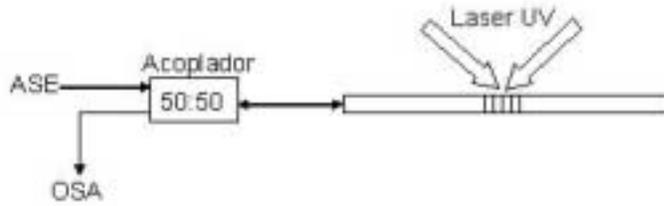


Figura 5.10: Monitoramento por reflexão.

Antes de fazer as duas cavidades funcionarem simultaneamente, bombeamos cada uma delas separadamente e obtivemos uma emissão laser para cada uma. A seguir, estão os gráficos de potência de saída em função de potência de entrada (bombeio).

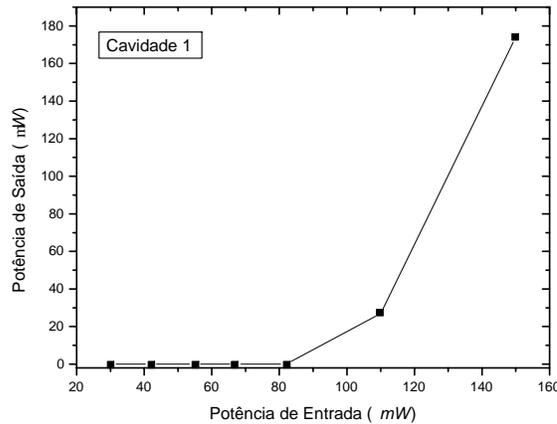


Figura 5.11: Potência de saída em função de potência de entrada para a cavidade 1.

Como as reflectividades das redes de Bragg que delimitavam a cavidade 1 eram maiores, 95% e 80%, essa cavidade deveria apresentar um limiar laser menor que a cavidade 2, que possuía redes com reflectividades de 80% e 60%. Entretanto, os gráficos mostram o contrário. Acontece que mesmo quando não bombeada, a cavidade 2 interfere na cavidade 1 absorvendo parte da radiação laser emitida por ela. Isso explica a diferença mostrada pelos gráficos.

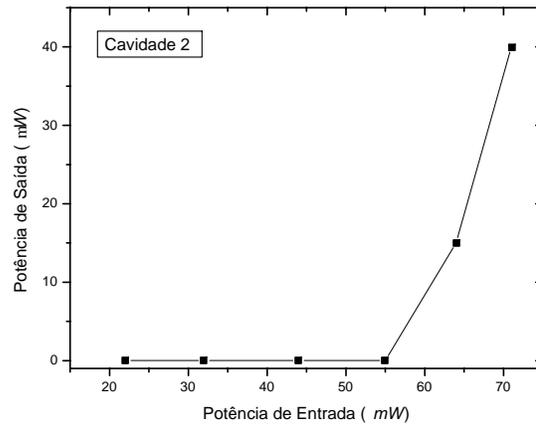


Figura 5.12: Potência de saída em função de potência de entrada para a cavityde 2.

Para comprovarmos a operação laser das cavitydes, observamos a evolução dos espectros de emissão conforme o aumento da potência de bombeio (em  $980\text{ nm}$ ) na cavityde 1 (figura 5.1). As figuras mostram uma seqüência de espectros em que a cavityde 1 foi bombeada com uma potência abaixo de  $80\text{ mW}$  (figura 5.13) e, posteriormente, acima deste valor (figura 5.14). No eixo vertical de cada gráfico estão os valores da potência de saída, enquanto no eixo horizontal está a faixa de comprimentos de onda. As figuras mostram que, para potências de bombeio acima do limiar laser (figura 5.11), ocorre um estreitamento do espectro de emissão.

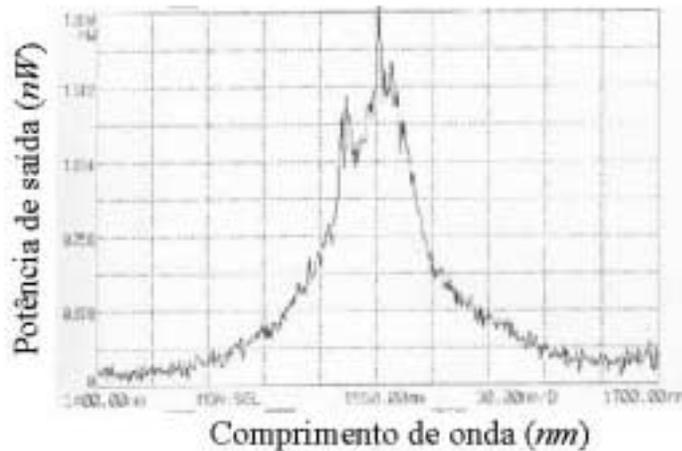


Figura 5.13: Espectro de saída do laser (bombeio  $< 80\text{ mW}$ ).

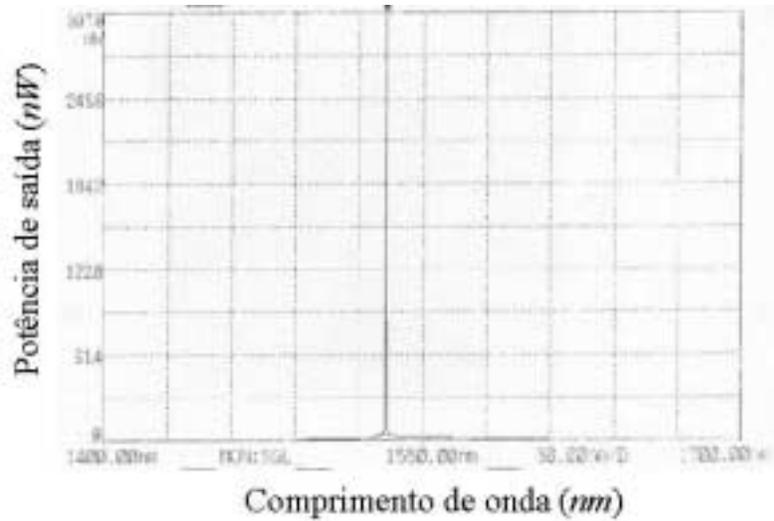


Figura 5.14: Espectro de saída do laser (bombeio > 80 mW).

A seguir, na figura 5.15, temos o espectro de saída do laser, com as duas cavidades funcionando simultaneamente.

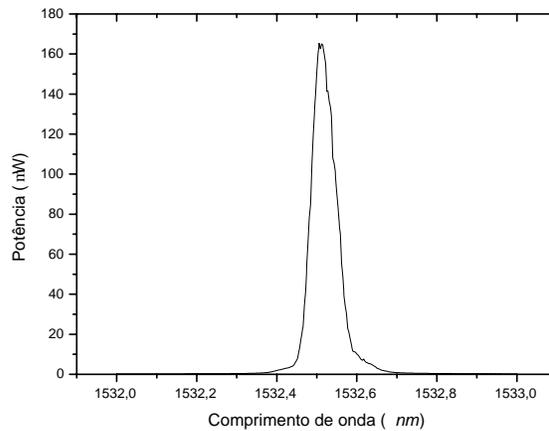


Figura 5.15: Espectro de saída do laser.

Foi alcançada uma potência de  $165,4 \mu W$ . Embora seja possível conseguir uma potência mais alta na saída, isso faz com o laser se torne instável e multimodo.

Em resumo, propusemos e mostramos a construção de um laser a fibra dopada com  $Er^{3+}$  usando cavidades acopladas. O laser, usando uma fibra doada pelo Instituto de Pesquisa da ACREO/Suécia, operou

de forma estável. A emissão foi centrada em um comprimento de onda  $\lambda = (1532,51 \pm 0,05) nm$ .