Controle da frequência de um laser de diodo de alta potência utilizando a técnica de injeção ótica

A.M. Tuboy, D.M.B.P. Milori e V.S. Bagnato

Departamento de Física e Ciências dos Materiais,

Instituto de Física de São Carlos - USP

Caixa Postal 369, 13560-970, São Carlos, SP, Brasil

Recebido em 29 de fevereiro, 1996

Neste trabalho demonstramos a redução da largura de linha e estabilização da frequência de um laser de diodo de alta potência (~100mW) (laser escravo), através da injeção ótica proveniente de uma pequena parte do feixe de um segundo laser (laser "master"), que foi previamente estabilizado pela técnica de reijeção ótica por grade de difração. A largura de linha do laser escravo foi reduzida de um valor de 20MHz para um valor estimado de 1MHz. A técnica também possibilitou uma sintonização em frequência num intervalo maior que 1 GHz, variando somente a frequência do laser "master". A estabilização em frequência foi realizada utilizando-se uma das linhas de absorção saturada do césio. O sistema atualmente é utilizado para obtenção de amostras de átomos aprisionados de césio.

In this work we demonstrated the reduction of the linewidth and frequency stabilization of a high power diode laser (~100mW) (slave laser) by optical injection coming from a second low power diode laser (master laser) which is previously stabilized by the optical feedback from a diffraction grating. The linewidth of the slave laser was 20MHz and by optical injection this linewidth gone to 1 MHz, and the frequency tuning was better than 1 GHz, changing only the master laser frequency. The laser frequency is locking in D_2 - line of the cesium atoms. Actually the system has been used to produce samples of trapped cesium atoms.

I. Introdução

As pesquisas realizadas na área de física atômica envolvem, em geral a interação de átomos com a luz, portanto lasers que possam ser sintonizáveis em transições atômicas são, agora, ferramentas impresindíveis em laboratórios que realizem tais experimentos. As fontes tradicionalmente utilizadas neste caso são os lasers de corante sintonizáveis e, mais recentemente, lasers de Ti-Safira. Entretanto, a utilização dos lasers de diodo tem aumentado significativamente nos últimos anos, apesar de suas características de sintonização da frequência apresentarem problemas que descreveremos abaixo. Uma das causas pela grande procura aos lasers de diodo é o seu baixo custo e a relativa simplicidade de funcionamento se comparada as fontes tradicionais citadas acima.

Um laser de diodo em funcionamento livre pode ser sintonizado num intervalo total de comprimento de onda da ordem de 15 nm. Isto é alcançado somente com a variação da temperatura e da corrente de alimentação. Esta sintonização não é contínua, porque a variação da frequência com a temperatura e com a corrente não coincidem. Desta forma, existem frequências que não são ascessíveis, chamadas de "gaps", ou "pulos de modo". Isto limita um pouco a utilização destes lasers. Entretanto, o principal limitante da utilização destes lasers em física atômica e outras aplicações é o valor da sua largura de linha que em regime de estabilização primária (controle de temperatura e corrente) é tipicamente de algumas dezenas de MHz.

Essas caraterísticas podem ser melhoradas utilizando-se a grande sensibilidade destes lasers ao retorno ótico. Vários esquemas explorando esta sensibilidade tem surgido como técnicas de redução da largura de linha e estabilização. Umas das técnicas que resulta numa grande redução da largura de linha e estabilidade em frequência utiliza o retorno ótico através de uma cavidade confocal de Fabry-Perot[1,2]. Apesar de possibilitar excelentes resultados, a sua sintonização permanece limitada pelo recurso oferecido pelo laser primariamente estabilizado. As vantagens desta técnica são com relação à redução da largura de linha. Uma segunda técnica, utiliza uma das faces do laser e uma grade de difração em configuração Littrow[2,3] para formar uma cavidade com melhor qualidade, diminuindo a largura de linha e aumentando o intervalo de sintonização do laser eliminando os "pulos de modo" presentes na cavidade intrinsica do laser.

Normalmente estas duas técnicas são utilizadas em lasers de baixa potência (menores que 20 mW). Com os recentes desenvolvimentos na área de semicondutores, principalmente com relação ao aumento da potência de emissão, hoje já é disponível comercialmente lasers de diodo com potência superior a 100 mW. Mas a largura de linha, ainda permanece da ordem de dezenas de MHz. A utilização das técnicas acima implicam num aumento das perdas proporcional ao aumento da potência. Assim, para manter a alta potência do laser livre, mas com largura de linha reduzida desenvolveu-se uma técnica de injeção ótica[4,5], na qual o feixe, proveniente de um segundo laser de baixa potência que previamente sofreu uma redução da largura de linha através de uma das duas técnicas anteriores é injetado no interior da cavidade laser de alta potência.

Neste trabalho demonstramos a redução da largura de linha e a estabilização de um laser de alta potência através deste método de injeção ótica e utilizamos este sistema para a obtenção de uma amostra de átomos frios de césio através de aprisionamento magneto-ótico.

II. Aparato experimental

O conceito básico da injeção envolve a injeção de um feixe de baixa potência de um laser estável com largura de linha reduzida, chamado laser "master", na cavidade de um laser de alta potência, chamado laser escravo. O objetivo desta injeção é extinguir todos os modos livres do laser escravo e amplificar o modo do laser "master".

Os primeiros experimentos realizados de injeção ótica para estabilização de frequência de laser foram em lasers de He-Ne na década de 60 [6] e em CO_2 na década de 70 [7].

Em lasers de diodo esta técnica começou a ser aplicada durante a década de 80 [8,9], onde se desejava uma fonte de alta potência, mas com qualidade espectral, que podiam ser facilmente obtidas com lasers de baixa potência.

Devido a baixa qualidade da cavidade laser, o intervalo de acoplamento geralmente é alto para uma pequena potência de injeção. Esta técnica também torna-se muito interessante para a aplicação em diodo-laser tipo "array"[10], de modo a obter-se fontes com altíssima potência (acima de 1W), preservando boas qualidades espectrais, e o mínimo de correlação entre os elementos emissores do "array".

O nosso experimento utiliza lasers comerciais da STC e SDL que possuem potências inferiores a 100 mW. Os comprimentos de onda dos lasers são em 852 nm, que correspondem a linha D_2 do átomo de césio.

O aparato experimental completo está descrito na figura 1. O laser "master" é um laser da STC modelo LT50 com largura de linha de ~20-40 MHz e potência de saida máxima de 40 mW. O laser escravo é um laser da SDL modelo 5410-C que pode emitir até 100 mW. Ele possui uma largura de linha em torno de 20 a 40 MHz. Ambos os lasers possuem estabilização em temperatura ao nível de de 0.01 °C e estabilização em

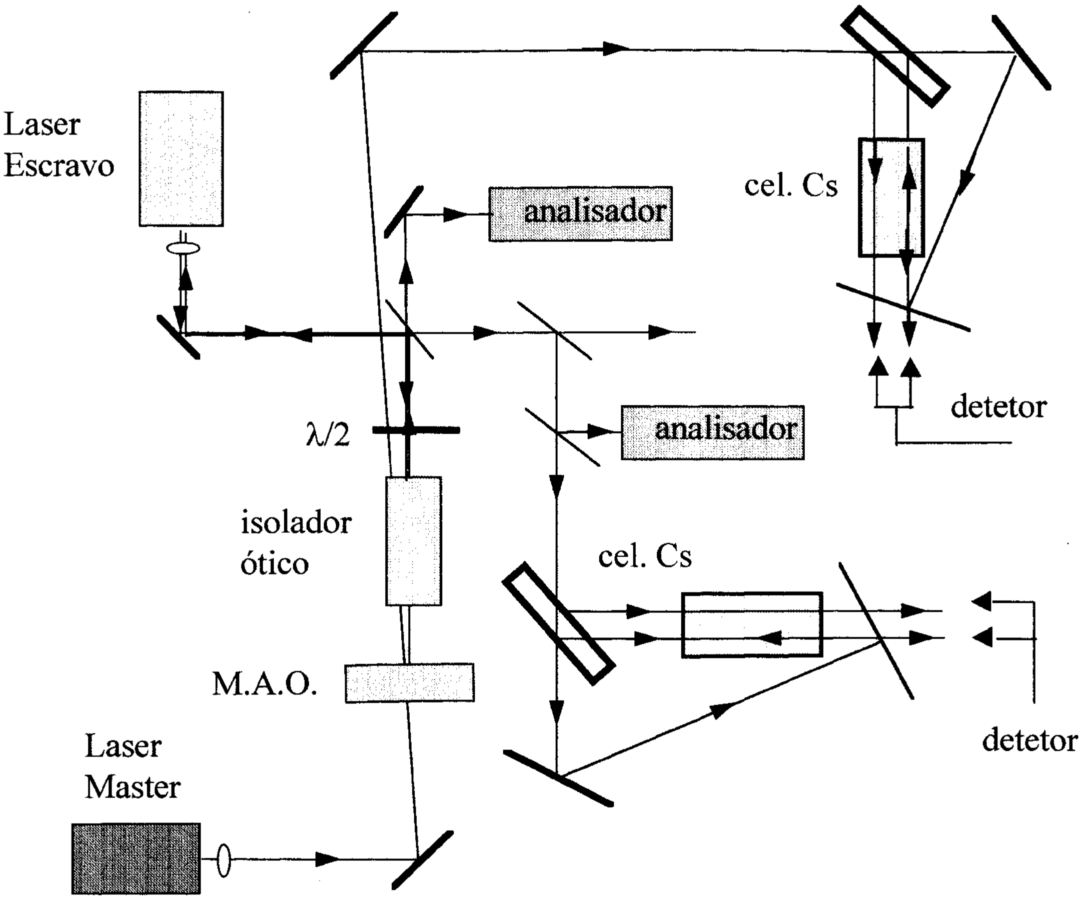

Figura 1: Esquema experimental para redução da largura de linha de laser de diodo de alta potencia (100 mW) através de injeção ótica proveniente de outro laser de diodo cuja largura de linha foi previamente reduzida pela técnica de grade de difração. Está descrito também todo conjunto de isolamento ótico e todas as absorções saturadas realizadas.

corrente em torno de 10μA [11]. A montagem básica destes lasers segue a descrição já feita previamente em publicações anteriores[2,11].

Para evitar retorno de luz ao laser "master", o feixe laser passa por um modulador acusto-ótico e um isolador ótico, como mostra a figura 1. O isolador ótico funciona com base no efeito "Faraday" e neste caso é comercial (ISOWAVE), o modulador acusto-ótico desloca em frequência e espacialmente a primeira ordem do feixe. O deslocamento espacial é utilizado no isolamento e deslocamento em frequência é utilizado na estabilização fina de frequência que será descrita na próxima seção. A ordem um produzida pelo modulador acusto-ótico ($\sim$8mW) atravessa uma lâmina de meia onda ($\lambda/2$) que gira a polarização da luz de $\pi/2$ a fim de se obter o casamento com a polarização do laser escravo. Uma pequena parte do feixe ($\sim$ 0.5 mW) é desviado por uma lâmina de microscópio e é injetada no laser escravo. A outra parte do feixe utilizamos para realizar uma medida de absorção saturada numa célula de vapor de cesio.

O feixe oriundo do laser escravo, já estabilizado, passa pela mesma lamina e é dividida em dois. O feixe mais intenso segue para ser utilizado em experimentos e o feixe fraco é utilizado para realizar outra medida de absorção saturada numa segunda célula de vapor de césio. As duas absorções são utilizadas como auxiliares para identificar o momento em que o laser de alta potência se acopla com o "master".

Além desse acompanhamento com os sinais de absorção saturada, monitoramos a largura de linha dos dois lasers com um analisador de espectro de construção própria.

Na figura 2 observamos os dois sinais provenientes da absorção saturada colocados num mesmo gráfico, onde claramente vemos a sintonização em frequência do laser escravo acompanhando o "master", apesar da sua corrente de alimentação ser mantida constante.

As linhas estão deslocadas porque a absorção do laser "master" é realizado no feixe de ordem zero do modulador e o laser escravo está acoplado ao feixe de ordem um.

O intervalo que o laser escravo consegue acompanhar o "master" é maior que 1 GHz. Existe também uma segunda possibilidade de sintonizar o laser escravo variando a frequência do modulador acustico-ótico, o que é uma característica do novo sistema.

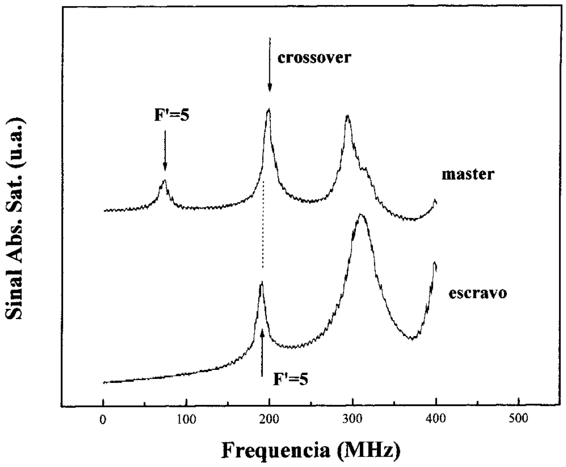

Figura 2: Espectros de absorção saturada realizada em duas células de vapor de césio, um com o laser "master" e o outro com o laser escravo, realizadas simultaneamente. Neste espectro procura-se verificar o acompanhamento do laser escravo à partir da varredura do laser "master".

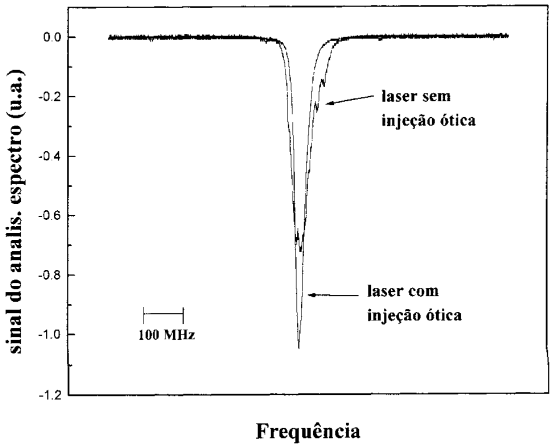

Figura 3: Sinal obtido no analisador de espectro do laser escravo livre e do laser escravo com a injeção ótica.

A figura 3 mostra o sinal do analisador de espectro do laser escravo livre e do laser escravo com injeção, onde observamos claramente uma redução da largura de linha. A largura de linha do laser livre está limitada pela estabilizacão primária (temperatura e corrente[11]) e seu valor é aproximadamente 20MHz . A largura de linha do laser estabilizado não pode ser estimado diretamente pelo gráfico apresentado, pois o sinal é limitado pela resolução do analisador de espectro, que possui uma finesse de 60 e um intervalo espectral livre de 1.5GHz. A medida de lMHz da largura de linha foi realizada através do acompanhamento da variação do sinal do analisador, no ponto correspondente a largura à meia altura do laser e aproximando esta função de "Airy" nesse ponto, pela sua derivada. Através de uma regra de três simples comparamos esta flutuação em intensidade de sinal com a variação em frequência, que resultou numa variação menor que 1MHz . Esta estimativa da largura de linha do laser foi confirmada, após a obtenção de amostras de césio aprisionadas, que necessitam de fontes lasers com larguras de linha menores que a largura de linha da transição envolvida no processo que é 5MHz.

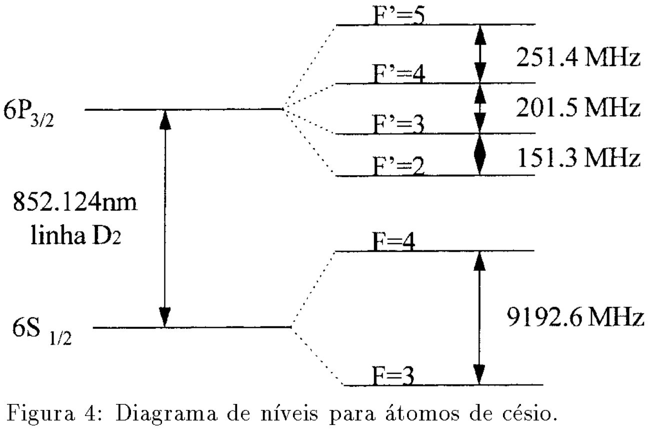

Figura 4: Diagrama de níveis para átomos de césio.

Esta técnica descrita acima permite uma redução da largura de linha, mas as variações lentas da frequência não são controladas. Nestes casos o que comumente se utiliza é um sistema eletrônico de correção da frequência cujo sinal de referência vem de um sinal de absorção saturada. O laser é estabilizado no pico de uma das linhas de absorção saturada do césio. Como este sistema foi construido para ser utilizado no aprisionamento magneto-ótico de césio[12] e normalmente os átomos começam a ser aprisionados numa frequência levemente deslocada do pico da ressonância, o sinal de referência precisa ser deslocado alguns MHz do pico. A solução encontrada foi a utilização do feixe de ordem zero do modulador acustico-ótico que é naturalmente deslocado em frequência com relação a frequência do laser escravo, para utilização do sinal de referência.

O deslocamento em frequência sofrida pela ordem um, quando atravessa o modulador, pode ser sintonizado pelo gerador de RF em torno de 120 MHz.

O aprisionamento é realizado numa frequência que é 7 MHz abaixo da transição F=4 $\rightarrow$ F'=5 (veja o diagrama de níveis do césio, figura 4). O pico de absorção saturada mais próximo está a ~126 MHz e é um "crossover" entre as transições F=4 $\rightarrow$ F'=5 e F=4 $\rightarrow$ F'=4. Mas com relação à melhor frequência de aprisionamento ele está a 118 MHz por causa da dessintonia de 7 MHz. Portanto o modulador desloca 118 MHz o feixe de ordem um com relacão a ordem zero. Utiliza-se o feixe de ordem zero para realizar uma absorção saturada cujo pico de "crossover" servirá como sinal de referência e o feixe de ordem um estará na frequência correta de aprisionamento e será injetado no laser escravo.

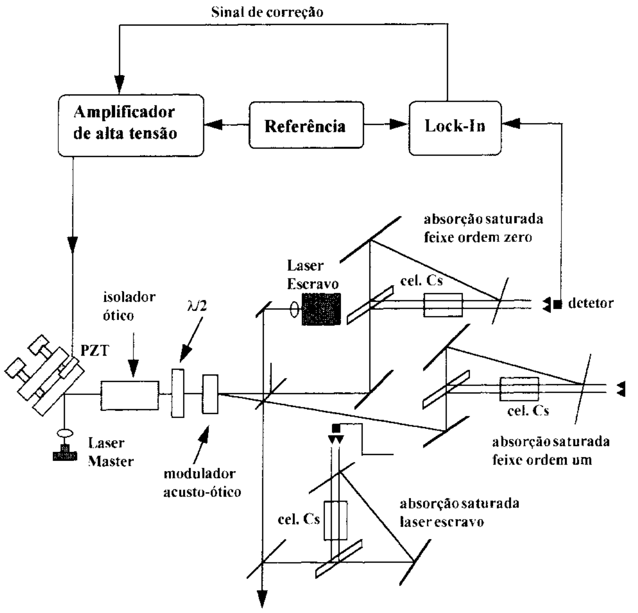

Figura 5: Esquema de estabilização eletrônico para o laser "master" usando o sinal de absorcão saturada.

A correção em frequência utilizando o pico de absorção está esquematizado na figura 5. Ela consiste em corrigir a variação de frequência do laser "master" ajustando a posição da grade de difração. Isto é realizado injetando uma pequena modulação na cerâmica PZT que controla o ângulo da grade de difração. Esta modulação provoca uma pequena variação na frequência do laser e consequentemente no sinal de absorção. O sinal é enviado num amplificador "lock-in" que detecta a variação do sinal e envia uma correção para a grade de difração através do amplificador de alta tensão. Deste modo o laser "master" mantém a frequência em torno do pico da absorção e consequentemente o laser escravo consegue uma estabilidade que permite aprisionar átomos de césio durante algumas dezenas de minutos.

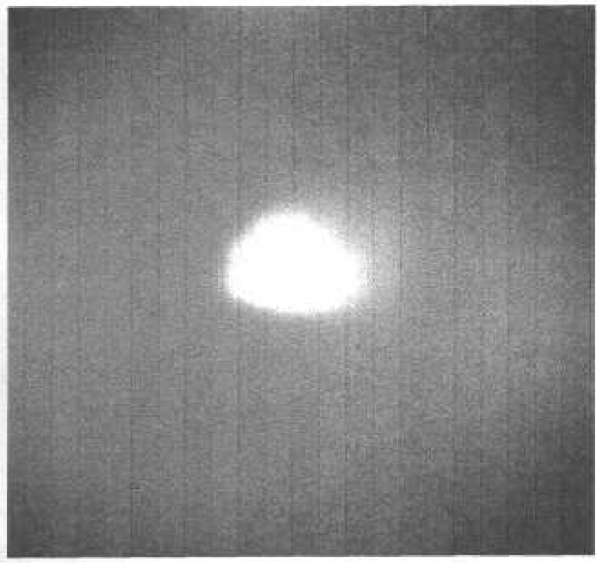

Figura 6: Imagem da nuvem de átomos de césio aprisionados utilizando sistema de lasers descrito.

Na figura 6 observamos a nuvem de átomos de césio aprisionados utilizando o sistema desenvolvido.

III. Conclusão

A injeção ótica de um laser de baixa potência num laser de alta potência é uma técnica muito interessante, pois possibilita conseguir fontes lasers estáveis com largura de linha reduzida e com potências altas (maiores que 50 mW) para utilização em muitos experimentos.

Com esta técnica foi conseguido um sistema laser, atualmente em utilização no laboratório, com potência de saida de 70 mW e largura de linha de 1 MHz. Este laser é usado no aprisionamento de átomos de césio, possibilitando vários experimentos com estas amostras frias como: colisões de átomos em regimes de baixas temperaturas, medidas de constantes da armadilha como constantes de mola e amortecimento e futuramente será realizado experimentos de colisões de elétrons com estes átomos visando obter valores mais precisos de secão de choque de ionização.

Agradecimentos

Este trabalho foi possível devido ao suporte financeiro do CNPq, CNPq-RHAE, PADCT e FAPESP. Os autores agradecem grandemente pelo apoio técnico: Edivaldo Cardoso, Gilberto Vitorino, Carlos Nazareth, Rui Pietronero e Silvio Tonissi.

References

1. B. Dahmani, L. Hollberg, R. Drullinger, Opt. Lett. **12**, 876 (1987).
2. A. M. Tuboy, M. S. Santos, V. S. Bagnato, Rev. Fis. Apl. e Instrum. **9**, 1 (1994).
3. K. C. Harvey e C. J. Myatt, Opt. Lett. **16**, 910 (1991).
4. M. de Labachelerie, C. Latrossa, P. Kemssu e P. Cerez, J. Phys. III France **2**, 1557 (1992).
5. J. Yu, M. -C. Gagné, C. Valentin, T. -L. Yuan e P. Pillet, J. Phys. III France **2**, 1615 (1992).
6. H. L. Stover e W. H. Steiner, Appl. Phys. Lett. **8**, 91 (1966).
7. C. J. Buczek e R. J. Freiberg, IEEE J. Quantum Eletron. **QE-8**, 641 (1972).
8. S. Kobayashi e T. Kimura, IEEE J. Quantum Eletron. **QE-17**, 681 (1981).
9. R. Lang, EEE J. Quanturn Eletron. **QE-18**, 976 (1982).
10. S. -Q Shang e H. J. Metcalf, J. Appl. Opt. **28**, 1618 (1989).
11. A. M. Tuboy, S. A. Tonissi Jr., M.S. Santos, V.S. Bagnato, Rev. Fis. Apl. e Instrum. **6**, 96 (l991).
12. E.L. Raab, M. Prentiss, A. Cable, S. Chu e D. Pritchard, Phys. Rev. Lett.**59**, 2631 (1987).