

Resposta Rápida de Lasers Semicondutores Nacionais

Álvaro Augusto A. de Salles e Maria Cristina R. Carvalho

Neste trabalho são apresentadas algumas considerações teóricas e os resultados experimentais de comportamento em altas frequências (de DC até 3 GHz) de diodos laser fabricados pelo CPqD da TELEBRÁS. São também discutidos os resultados obtidos.

1. Introdução

A caracterização de lasers diretamente modulados em frequências elevadas (por exemplo, na faixa de microondas) é importante, objetivando aplicações em sistemas de comunicações óticas de alta capacidade. Por outro lado, mesmo para aplicações em sistemas de menor capacidade, é desejável o conhecimento do comportamento do laser em banda mais larga, visando observar oscilações (**oscilações de relaxação**, ou até mesmo em alguns casos, **autopulsação**) que podem contribuir para a degradação do desempenho do sistema, e eventualmente para a redução da vida útil dos lasers.

Neste trabalho são apresentadas algumas considerações teóricas sobre o comportamento de diodos laser com modulação analógica e digital aplicadas diretamente (superpostas) à corrente de injeção. Em seguida, são apresentadas algumas medidas de resposta a pulsos rápidos e de resposta dinâmica à modulação CW ("continuous wave") numa faixa de DC ("direct current") a 3 GHz. Os diodos laser utilizados são fabricados pelo CPqD da TELEBRÁS em Campinas e são do tipo dupla heteroestrutura em GaAlAs ($\lambda \cong 0,85 \mu\text{m}$), um com geometria de fita (largura $\cong 18 \mu\text{m}$; comprimento $\cong 300 \mu\text{m}$) por difusão de Zn (laser tipo 1031) e outro com geometria "V-groove" (laser tipo 1039). As correntes de limiar são tipicamente da ordem de 115 mA, e as potências óticas em 120 mA e 130 mA são, respectivamente, cerca de 2 mW e 4 mW. Finalmente, são discutidos alguns resultados obtidos.

Os autores são Professores do Centro de Estudos em Telecomunicações da PUC/RIO, 22453, Rio de Janeiro, RJ.

2. Resposta à Modulação por Pulsos e Senoidal

Num sistema de comunicações óticas de alta velocidade, o sinal de informação modula em intensidade o diodo laser, cuja emissão ótica está acoplada à fibra. Na outra extremidade do enlace, um fotodetetor rápido é usado para detetar a intensidade ótica e recuperar o sinal original. O esquema correspondente a um enlace de comunicações óticas é mostrado na Fig. 1.

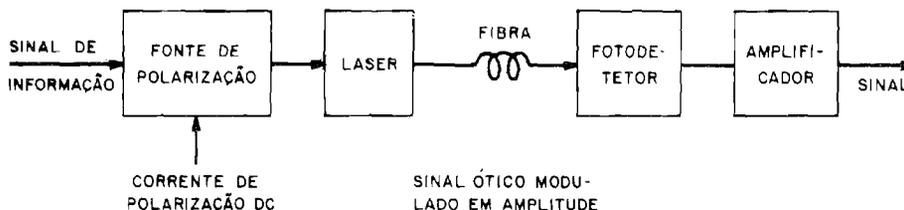


Figura 1. Esquema básico de um enlace de comunicações óticas.

A banda de transmissão do sistema pode ser determinada pela velocidade de modulação do laser, a velocidade do detetor e a largura de banda da fibra ótica. A largura de banda da fibra ótica é limitada pela dispersão. Atualmente valores típicos para o produto da largura de banda pelo comprimento em fibras multimodo são da ordem de 1 GHz.km.

A limitação da largura de banda nos lasers pode ser estabelecida por alguns parâmetros da região ativa do laser (por exemplo, o tempo de recombinação dos elétrons, o tempo de vida dos fótons, a densidade de fótons e de elétrons na região ativa, a relação entre a corrente de polarização e a corrente de limiar) ou pelos elementos parasitas da montagem (capacitâncias e indutâncias de empacotamento). É importante que os elementos parasitas no circuito elétrico equivalente não constituam uma limitação para a operação em alta velocidade.

Tradicionalmente a resposta de modulação do laser tem sido determinada usando-se uma solução direta das equações de taxa de recombinação e geração [1]. Assim, é possível mostrar que a resposta intrínseca da modulação de lasers se comporta como um circuito passa baixas de segunda ordem, com um pico de ressonância (frequência f_r) seguido de um decaimento da ordem de 40 dB por década, conforme indicado na Fig. 2.

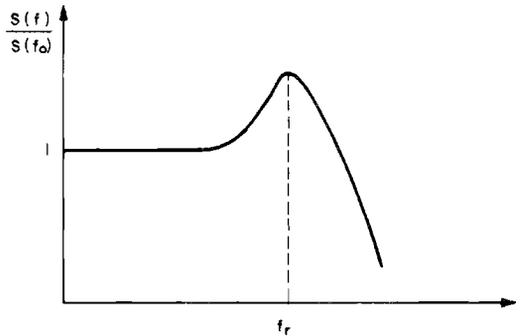


Figura 2. Resposta típica em frequência de um diodo laser com modulação CW, normalizada para a resposta em frequências baixas $S(f_0)$.

O aparecimento da **ressonância eletroótica** (ou oscilações de relaxação) [2] – [4] resulta da interação dos fótons com os portadores injetados (elétrons/lacunas). A resposta do laser a um instantâneo acréscimo da corrente é um imediato acréscimo na recombinação elétron/lacuna. Logo o aumento da densidade de fótons contribui rapidamente para a redução na distribuição dos portadores na região ativa (por recombinação estimulada), o que por sua vez irá acarretar uma redução na intensidade ótica até que a distribuição de portadores seja reposta pela corrente de injeção. Conseqüentemente, existe uma determinada frequência em que tanto a intensidade do sinal ótico produzido como a densidade de portadores oscilam, num fenômeno análogo à ressonância convencional em circuitos elétricos.

O pico de ressonância (ressonância eletroótica) cresce em frequência com o aumento da corrente DC de polarização. Para um laser de modo único, a frequência de ressonância f_r pode ser aproximada por [5]

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{\tau_s \tau_{ph}} \left(\frac{1}{I_{th}} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (1)$$

onde I é a corrente de injeção, I_{th} a corrente de limiar, τ_s é o tempo de vida de recombinação espontânea do elétron e τ_{ph} o tempo de vida do fóton.

Para modulação senoidal, o efeito desta ressonância é aumentar a eficiência de modulação [6], de tal forma que para frequências nas vizinhanças de f_r , uma maior amplitude de modulação do sinal ótico pode ser obtida usando uma dada corrente de modulação do laser. O ruído entretanto é maior nas vizinhanças da frequência de ressonância.

Para modulação por pulsos, o efeito da ressonância será produzir distorção dos pulsos e ruído, que podem degradar seriamente o desempenho de um sistema com o aumento da taxa de erro. Especialmente devido à menor contribuição das não linearidades dos lasers, a modulação digital (por exemplo, PCM – "Pulse Code Modulation") tem sido largamente utilizada em sistemas óticos. Na Fig. 3 está representada a modulação digital da portadora ótica por um sinal pulsado superposto à corrente de polarização DC.

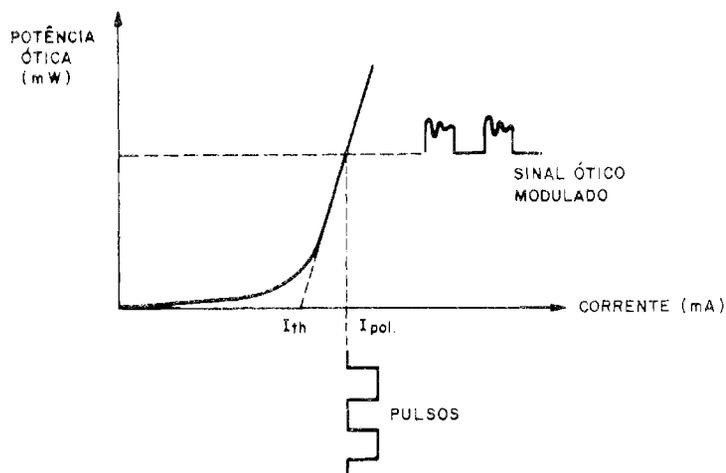


Figura 3. Modulação direta por pulsos de um laser semicondutor.

Quando um degrau de corrente é aplicado ao laser, aparecem usualmente o fenômeno de retardo de tempo e o fenômeno de oscilações de relaxação [1] – [3]. O retardo de tempo é desprezível quando o laser é polarizado no limiar ou acima dele. As oscilações decaem exponencialmente num período da ordem de grandeza do tempo de vida dos portadores na região ativa do laser. As frequências, ver (1), e a amplitude das oscilações de relaxação variam com a corrente de polarização.

Em alguns lasers, as oscilações não são amortecidas, sendo então chamadas de auto-pulsação [7]. Isto tem sido detetado mesmo com a aplicação somente de polarização DC, e é associado ao início de um fenômeno de degradação do laser.

3. Resultados Experimentais

Foram medidas a resposta a pulsos rápidos e a resposta em frequência (modulação senoidal) na faixa de microondas. Na Fig. 4 está representado o diagrama esquemático para medida da resposta pulsada dos diodos lasers.

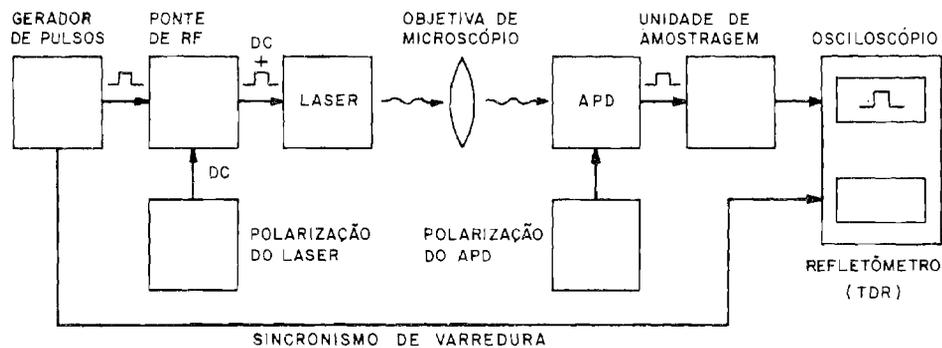


Figura 4. Diagrama esquemático para as medidas da resposta pulsada dos lasers.

O gerador produz pulsos rápidos (tempo de subida da ordem de 0,3 ns e duração ajustável) e o osciloscópio de amostragem tem tempo de resposta de 28 ps (DC até 12,4 GHz). Como a impedância de entrada do diodo laser é muito baixa (cerca de 2Ω a 3Ω [8]), uma resistência "chip" de 48Ω é montada em série com ele num circuito "microstrip". Assim, consegue-se uma boa adaptação em frequências até cerca de 3 GHz. Além disso, o laser fica mais protegido contra transitórios indesejáveis. O fotodetector avalanche (APD) utilizado, também montado em circuito "microstrip", apresenta uma frequência de corte da ordem de 3 GHz [9]. Alguns resultados típicos da resposta do laser de geometria de fita (tipo 1031) a pulsos positivos e negativos estão mostrados nas figuras 5 e 6 para diferentes valores da razão entre a corrente de polarização DC (I_L) e a corrente de limiar (I_{th}). Pulsos positivos produzem um crescimento de corrente de injeção e pulsos negativos produzem um decréscimo. Para a amplitude de pulso de 1 V, o pulso de corrente (na carga "chip" e no laser) é de cerca de 20 mA.

Observa-se que os pulsos óticos detetados têm tempos de subida (cerca de 0,4 ns) comparáveis aos dos pulsos elétricos incidentes. Os tempos de descida são mais longos, o que é atribuído a efeitos de difusão de portadores. As oscilações amortecidas decaem em tempos da ordem de 2 ns a 4 ns.

Na Fig. 7 está mostrada uma comparação das frequências de ressonância medidas com as calculadas utilizando (1). Aqui, o tempo de vida dos elétrons, calculado da envoltória das oscilações amortecidas [1], é $\tau_s = 0,8$ ns, o tempo de vida dos fótons é $\tau_{ph} = 1$ ps e a corrente de injeção é dada pela superposição da corrente de polarização DC (I_L) com a amplitude (I_p) da corrente dos pulsos elétricos aplicados. Observa-se que existe boa concordância entre os valores medidos e os estimados teoricamente.

Para as medidas de resposta em frequência utilizou-se o analisador de redes de microondas, controlado por microcomputadores, com "software" de calibração e correções de erros desenvolvido no CETUC [10]. Na Fig. 8 está mostrada uma representação esquemática da montagem utilizada para estas medidas.

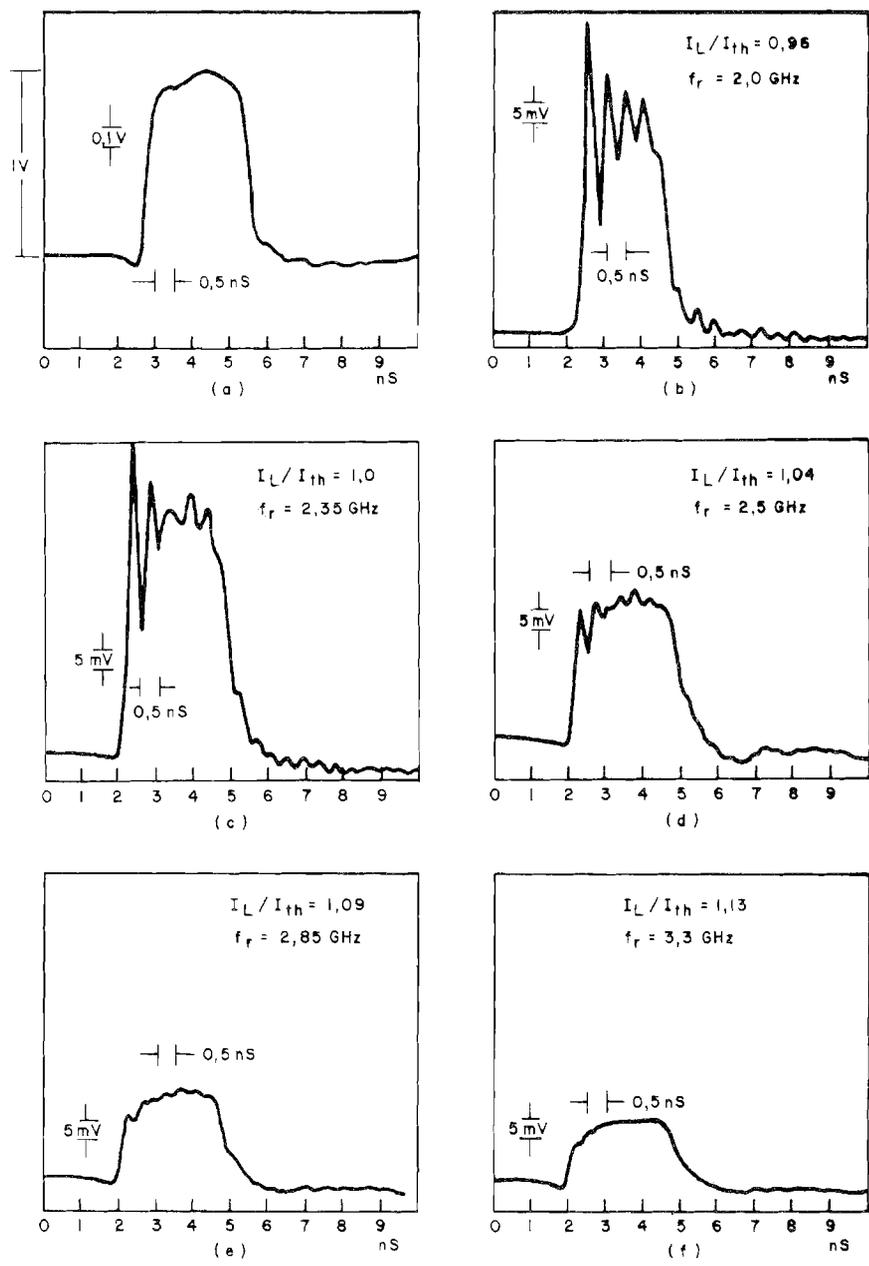


Figura 5. Resposta ótica a um pulso positivo (escala horizontal: 1 ns/divisão) em função da corrente de polarização normalizada. (a) Pulso elétrico aplicado; (b) a (f) pulso ótico detetado.

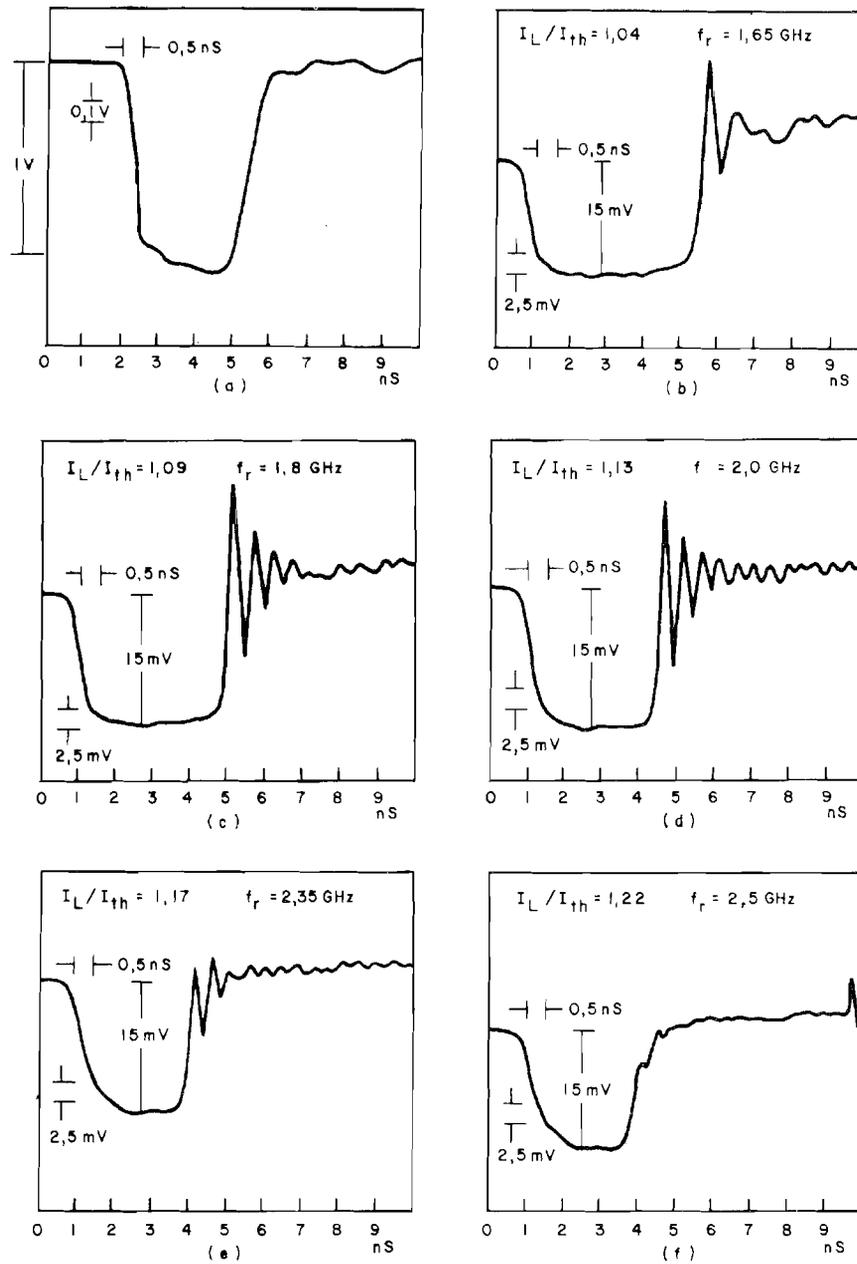


Figura 6. Resposta ótica a um pulso negativo (escala horizontal: 1 ns/divisão) em função da corrente de polarização normalizada. (a) Pulso elétrico aplicado; (b) a (f) pulso ótico detetado.

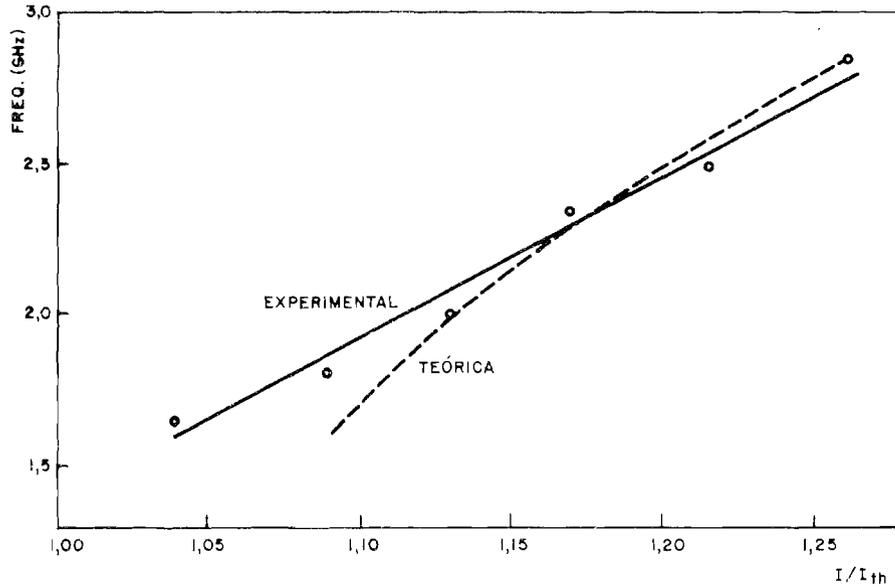


Figura 7. Comparação das frequências de oscilação medidas com as estimadas a partir de (1).

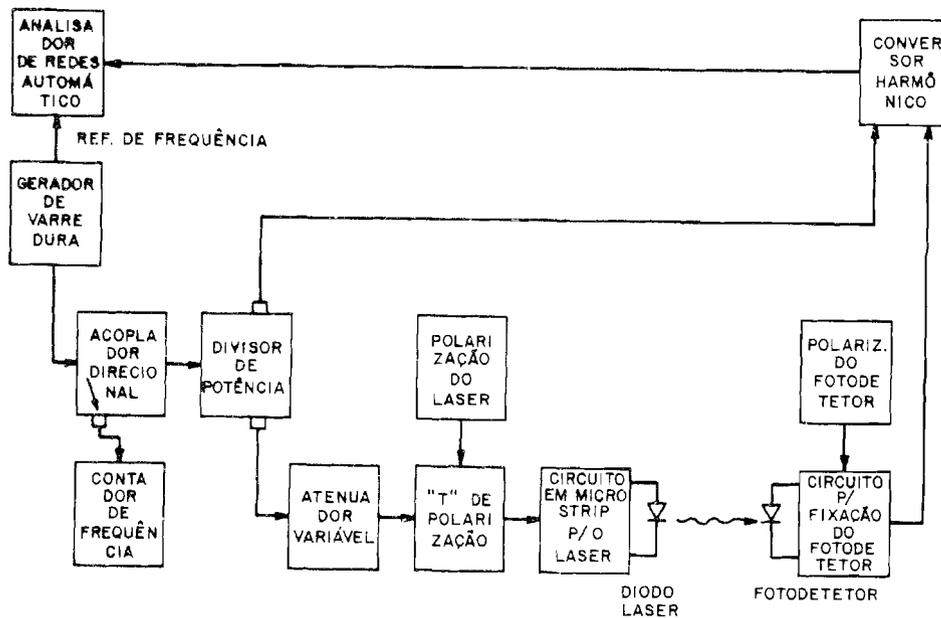


Figura 8. Representação esquemática da montagem para as medições da resposta em frequência dos lasers.

Nas **figuras 9 e 10**, são apresentadas as respostas em frequência (modulação CW) dos lasers com geometria de fita (tipo 1031) e "V-groove" (tipo 1039), respectivamente, numa faixa de DC até 3 GHz. Estas respostas estão normalizadas em relação à resposta em frequências baixas (f_0).

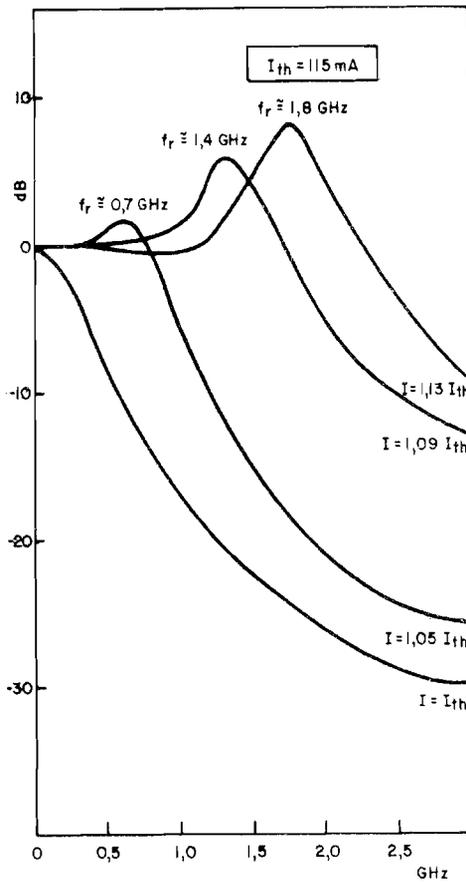


Figura 9. Resposta em frequência do laser 1031.

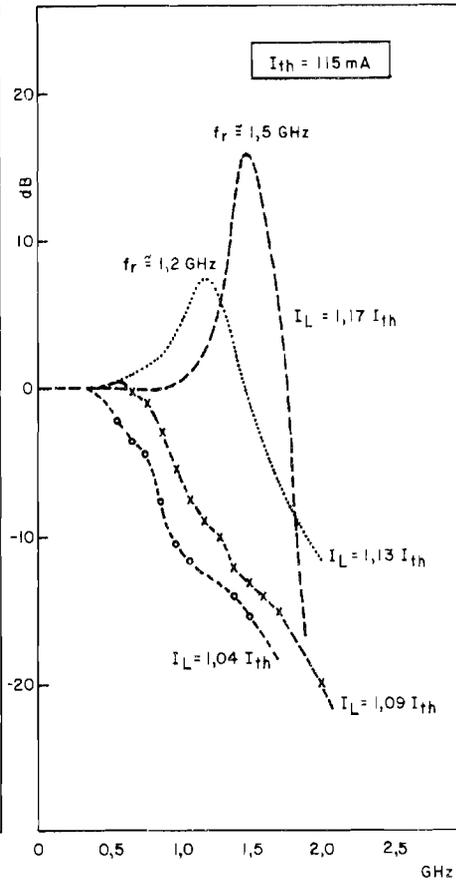


Figura 10. Resposta em frequência do laser 1039.

Conforme previsto pela teoria, observa-se uma região praticamente plana até a aproximação da ressonância onde ocorre o pico, com um decréscimo acentuado após este valor. Os valores das frequências de ressonância medidos estão bem próximos dos estimados através de (1), tomando-se $\tau_s = 2$ ns e $\tau_{ph} = 1$ ns. As diferenças entre os valores medidos e calculados são da ordem de 15 a 20%, o que pode ser considerado razoável tendo em vista as aproximações teóricas e os erros intrínsecos às medições.

4. Discussões e Comentários

Das **figuras 5 e 6** observa-se que os tempos de subida dos pulsos óticos detetados são aproximadamente tão pequenos (cerca de 0,4 ns) quanto aqueles dos pulsos elétricos aplicados ao laser. Oscilações de relaxação só ocorrem quando a corrente cresce (topo dos pulsos positivos ou após a subida dos pulsos negativos), o que é esperado pela teoria. As frequências das oscilações de relaxação aumentam com o acréscimo da corrente de injeção do laser, variando tipicamente da ordem de 1 GHz a 3 GHz. Comparações com os valores teóricos da frequência de ressonância apresentam boa concordância.

As medidas da resposta em frequência nas **figuras 9 e 10** mostram que, para correntes de polarização de cerca de 15% acima do limiar, a largura de banda com resposta praticamente plana é da ordem de 1 GHz.

Estão sendo estudadas técnicas visando aplainar a resposta em frequência e reduzir os efeitos da ressonância. Essas técnicas podem utilizar circuitos passivos (filtro supressor) ou circuitos ativos (compensação da resposta através de um FET — "Field Effect Transistor"). Com isto consegue-se em banda larga (maior que 1 GHz) uma resposta bastante plana [11], reduzindo-se então os efeitos de ruído e a variação do índice de modulação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Prof. Marbey M. Mosso pela montagem dos diodos laser nos circuitos "microstrip", ao Eng.^o Antonio Brandão pela colaboração nas medições e aos Eng.^{os} A.C. Bordeaux Régo e J. Salomão pelo fornecimento dos lasers. Este trabalho foi suportado pela TELEBRÁS através do contrato PUC — TELEBRÁS n^o 28/83.

Referências

- [1] P.M. Boers, M.T. Vlaadingerbroek e M. Danielsen, "Dynamic Behavior of Semiconductor Lasers", *Electronics Letters*, vol. 11, n^o 10, Maio 1975, pp. 206–208.
- [2] H. Kressel e J.K. Butler, "Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs", Academic Press, New York, 1977.
- [3] G.H.B. Thompson, "Physics of Semiconductor Laser Devices", John Wiley & Sons, New York, 1980.

- [4] H.C. Casey Jr. e M.B. Panish, "Heterostructure Lasers", Academic Press, New York, 1978.
- [5] T. Ikegami e Y. Suematsu, "Direct Modulation of Semiconductor Junction Laser", Electronics and Communications in Japan, vol. 51-B, nº 2, 1968, pp. 51-58.
- [6] T.L. Paoli e J.E. Ripper, "Direct Modulation of Semiconductor Lasers", Proceedings of the IEEE, vol. 58, nº 10, Outubro 1970, pp. 1457-1465.
- [7] T.L. Paoli, "Changes in the Optical Properties of CW AlGaAs Junction Lasers During Accelerated Aging", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 13, nº 5, Maio 1977, pp. 351-359.
- [8] A.A. de Salles e M.C.R. Carvalho, "Medidas do Circuito Equivalente de Entrada de Diodos Laser na Faixa de Microondas", Anais do 1º Simpósio Brasileiro de Microondas, São Paulo, Julho 1984, pp. 171-176.
- [9] A.J. Seeds, "The Optical Control of Avalanche Diode Oscillators", Ph.D. Thesis, University of London, 1980, p. 360.
- [10] S. Novak, "Computer Program for Semiautomatic Microwave Measurements for TEKTRONIX 4052 System", Publicação CETUC D-MO-01/82, Maio 1982.
- [11] M.C.R. Carvalho e A.A. de Salles, "Flat Microwave Responses of Directly Modulated Laser Diodes", Proceedings of the 1986 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Baltimore, Maryland, Estados Unidos, Junho 1986, pp. 523-526.



ÁLVARO AUGUSTO ALMEIDA DE SALLES nasceu em Bagé, Rio Grande do Sul, em 6 de março de 1946. Concluiu o curso de Engenharia Elétrica em 1968 na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Obteve o grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/RJ) em 1971 e o grau de Ph.D em Engenharia Elétrica na Universidade de Londres (University College) em 1982. De 1970 a 1978 foi Professor Assistente na PUC/RJ, realizando pesquisas no Centro de Estudos em Telecomunicações (CETUC) nas áreas de dispositivos passivos e ativos de microondas. De 1978 a 1982, durante seu programa de doutoramento no University College London, realizou pesquisas em radares (tipo "phased array") e em controle ótico de osciladores e amplificadores utilizando FETs de GaAs. Em 1982 retornou ao CETUC, onde realiza pesquisas teóricas e experimentais em componentes de microondas e eletroóticos

para comunicações e radar. Atualmente é Professor Associado na PUC/RJ. O Prof. Salles tem diversos artigos publicados em revistas e congressos internacionais nas áreas de microondas e dispositivos eletroóticos. É sócio fundador da SBMO – Sociedade Brasileira de Microondas e da SBT – Sociedade Brasileira de Telecomunicações, além de ser membro da Sociedade de “Electron Devices” do IEEE.



MARIA CRISTINA RIBEIRO CARVALHO nasceu em João Pessoa, Paraíba, em 4 de agosto de 1952. Concluiu o curso de Engenharia Elétrica em 1976 na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/RJ). Obteve o grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na PUC/RJ em 1978. Desde 1978 é Professor Auxiliar na PUC/RJ, realizando pesquisas no Centro de Estudos em Telecomunicações (CETUC), na área de componentes de microondas e eletroóticos para comunicações. É sócia fundadora da SBMO – Sociedade Brasileira de Microondas e da SBT – Sociedade Brasileira de Telecomunicações. É membro do IEEE.