

Laser de Semicondutor Visível: um Instrumento Didático de Baixo Custo

T. Catunda, A. Pataia, A. Romero, J. Sartori e L. A. O. Nunes

Instituto de Física de São Carlos - USP
Caixa Postal 369, 13560-970, São Carlos, SP, Brasil
(email: tomaz@ifqsc.sc.usp.br)

Recebido 22 de agosto, 1997

Este trabalho tem por finalidade o desenvolvimento de um sistema de laser de semicondutor visível, compacto e de baixo custo. Utilizamos lasers de GaInP, emitindo a $\lambda \sim 670\text{nm}$ com potência 4 mW. Estes lasers têm corrente de limiar de oscilação I_{th} (“threshold current”) entre 50 - 80mA e operam tipicamente com correntes $\sim 5\text{mA}$ acima de I_{th} . Apresentamos três tipos de circuitos de fontes de alimentação para os lasers que estabilizam a corrente (fonte de corrente constante FCC) ou a potência luminosa (fonte de potência constante FPC). O custo do sistema completo, incluindo o laser de diodo, lente colimadora de plástico, partes eletrônicas e montagem mecânica é $\sim 50\text{\$}$.

The aim of this work is the development of a compact and low cost visible laser diode system. We used GaInP lasers, emitting at $\sim 670\text{nm}$ with $\sim 4\text{ mW}$ power. These lasers present threshold currents in the range $I_{th} \sim 50 - 80\text{ mA}$ and operate typically at currents $\sim 5\text{mA}$ above I_{th} . We presented three kinds of power supplies circuits that stabilize the current (ACC - automatic current control) or light power (APC). The cost of the whole system, including diode laser, collimating lens, electronics and mechanical parts is about 50\$.

I. Introdução

Lasers têm tido um grande impacto nos mais importantes ramos da ciência: separação de isótopos, interrogação de novos materiais na escala de femtosegundos, resfriamento de átomos, etc.. Calcula-se que atualmente mais de um terço dos trabalhos científicos experimentais publicados nas áreas de física e química utilizem lasers. Também nas áreas tecnológicas lasers são cada vez mais importantes: aplicações industriais como corte e solda, comunicações óticas, cirurgia a laser, memórias óticas, e tecnologias emergentes como a ótica integrada. O objetivo deste trabalho é popularizar o uso dos lasers de semicondutor (um laser de baixo custo) tornando-o esta poderosa ferramenta mais acessível. Neste sentido, apresentamos pequeno um resumo de suas propriedades básicas e detalhes práticos para construção de um sistema de laser de semicondutor de baixo custo. Apresentamos 3 circuitos diferentes para fonte de corrente de laser discutimos o comportamento dos lasers utilizando estas fontes.

Os lasers de semicondutor foram desenvolvidos em 1962, apenas 3 anos após o surgimento do primeiro laser (o laser de rubi) entretanto sua tecnologia teve de evoluir muito para chegar ao estado atual. O alto desempenho e confiabilidade dos lasers de GaAs 0.8mm permitiu, no final da década de 70, seu uso no mercado de audio em “compact-disk” (CD). Este é até hoje o único mercado de produção em massa para lasers de semicondutor, absorve mais de 90% de todos os lasers produzidos no mundo e representa um mercado anual da ordem de 50 milhões de lasers [1]. Outra aplicação importante dos lasers de semicondutor é em comunicações óticas onde se deseja lasers em 1.3 ou 1.5 μm , neste caso usa-se o sistema quartenário de InGaAsP. Há cerca de 15 anos começou-se a desenvolver a tecnologia dos lasers de semicondutor visíveis de InGaAlP, cobrindo a região espectral de 0.63-0.69 μm .

O melhor argumento que se pode dar a favor do uso de lasers de semicondutor em laboratórios de ensino é seu baixo custo. Atualmente pode-se construir um sistema de laser de semicondutor visível (incluindo o laser,

lente colimadora e fonte de corrente) com potência $\sim 3\text{mW}$, por um custo 50\$. Este laser pode substituir os lasers de HeNe que são tradicionalmente usados em laboratórios de ensino. O baixo custo dos lasers de semicondutor torna-os acessíveis ao ensino de segundo grau e instituições de ensino superior que atualmente não possuem lasers.

II. Noções básicas sobre lasers de semicondutor

Apresentaremos a seguir uma breve revisão das propriedades básicas dos lasers de semicondutor mais relevantes a este trabalho. Uma revisão mais detalhada pode ser encontrada na ref [2] e no caso específico dos lasers visíveis na ref [3].

emissão laser em semicondutores - os diodos emissores de luz ou “LED” funcionam graças a emissão de luz devido a recombinação de elétrons e buracos numa junção p-n. Se os semicondutores (tipo p e n) são suficientemente dopados e submetidos a alta corrente, então a inversão de população de elétrons e buracos pode ser induzida na região da junção. Desta maneira colocando-se a junção numa cavidade ótica pode-se obter um laser. No caso dos lasers de semicondutor seu índice de refração é suficientemente alto ($n \sim 3.5$) de tal forma que a própria refletividade da interface semicondutor/ar ($R \sim 0.30$) é suficiente para sustentar sua ação laser.

Em 1969 foram desenvolvidos os primeiros lasers de heterojunção (junção semicondutora entre dois materiais diferentes) que funcionam muito melhor que os lasers de homojunção (junção p-n de um mesmo material). A principal vantagem do laser de heterojunção é que a diferença de energia da banda proibida dos dois materiais ajuda a confinar os portadores (elétrons ou buracos) dentro da região da junção. Desta maneira consegue-se aumentar muito a eficiência, a potência do laser e diminuir sua corrente de limiar (“threshold”). Depois desenvolveu-se os lasers de heterojunção dupla que são até 20 vezes mais eficientes que os lasers de homojunção. Esta tecnologia foi inicialmente desenvolvida para os lasers de arseneto de gálio e arseneto de alumínio. Variando-se a concentração de gálio e alumínio, estes lasers cobrem a região espectral de 700 a 850nm (infravermelho próximo).

Para o funcionamento do laser é preciso além do confinamento dos portadores na sua região ativa, confinar a luz numa pequena faixa (“strip”) ao longo do plano da junção. Isto pode ser feito de duas maneiras:

guiamento através do ganho (“gain-guiding”) ou guiamento do perfil de índice de refração (“index-guiding”). No caso de guiamento de ganho a inversão de população só é feita numa faixa definida pela forma do eletrodo. No caso do confinamento de índice, o confinamento é obtido através de perfil de índice de refração adequado. O resultado final, necessário para obtenção da ação laser, é que a emissão laser se propague numa região pequena em ambas direções transversal e lateral, ou seja perpendicular ou ao longo do plano da junção. A seguir veremos que os lasers índice guiados têm características superiores aos lasers ganho guiado.

Uma vez que as dimensões transversais da região ativa são comparáveis ao comprimento da luz a emissão é fortemente divergente tal como ilustrado na Figura 1. Para os lasers visíveis da Toshiba as meia larguras típicas são $\theta \sim 8^\circ$ e $\theta \sim 30^\circ$ [4].

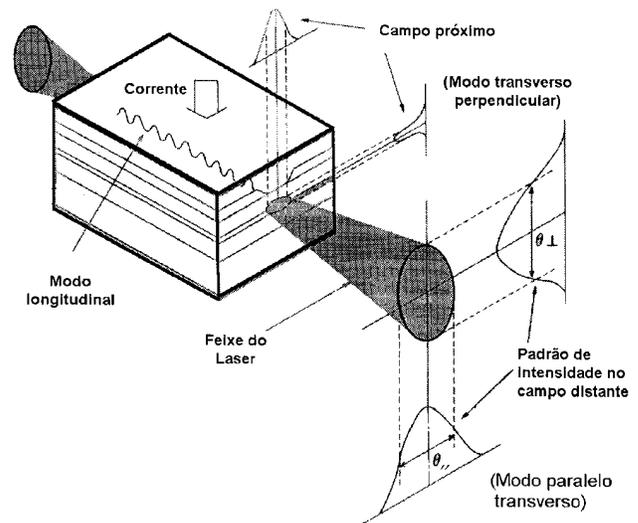


Figura 1. Laser de Semicondutor e suas características óticas [4].

A Figura 2 mostra curvas típicas de potência versus corrente de injeção. O termo corrente de limiar I_{th} (“threshold”) é definido pela extrapolação da porção reta da curva até o ponto de potência nula. Logo a potência e saída P pode ser aproximadamente dada por:

$$P = \eta_{ex} h\nu (I - I_{th}) \quad (1)$$

onde η_{ex} é definido como eficiência quântica externa, taxa de mudança de potência por incremento de corrente acima do limiar. Tipicamente os lasers visíveis com guiamento de índice têm I_{th} 75% menor que os com guiamento de ganho. A Figura 2 mostra que existe uma forte dependência de I_{th} com temperatura o que acarreta variação da potência do laser devido a variação da

temperatura ambiente se sua corrente permanece constante. Esta dependência com a temperatura é impilicadamente descrita por:

$$I_{th}(T) = I_0 \exp(T/T_0) \quad (2)$$

onde I_0 é uma constante. Medindo $I_{th}(T)$ variando T entre 0 e 40°C observamos a validade de (2) com $T_0 \sim 109\text{K}$ para um modelo de laser visível (9211 da Toshiba - $\lambda \sim 670\text{nm}$). Nos lasers de AsGa T_0 é tipicamente $\sim 150\text{K}$, logo os lasers visíveis são mais sensíveis a variação de temperatura que os lasers de AsGa.

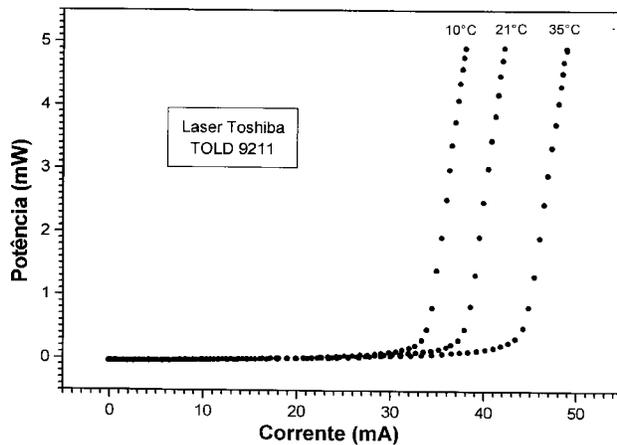


Figura 2. Curvas de potência x corrente para um laser visível ($\lambda \sim 670\text{ nm}$) a temperaturas de 10°C, 21°C e 35°C.

polarização - uma vez que a dimensão transversal da região ativa do laser é muito maior que sua dimensão lateral o laser pode ser pensado como um guia de onda dielétrico infinito. Neste tipo de estrutura há dois padrões distintos de distribuição dos campos: os modos transversais TE e TM. Como a refletividade dos modos TE é maior que a dos modos TM, as perdas são menores e conseqüentemente a corrente de limiar é menor. Conseqüentemente a emissão é fortemente polarizada com o campo elétrico oscilando na direção paralela ao plano da junção. A razão entre estas duas polarizações aumenta linearmente a potência do laser de modo aproximadamente linear. Para um laser visível com guiamento de índice, operando com 5mW esta razão é ~ 350 enquanto que para um laser similar com guiamento de ganho operando na mesma potência, a razão é 100 [3].

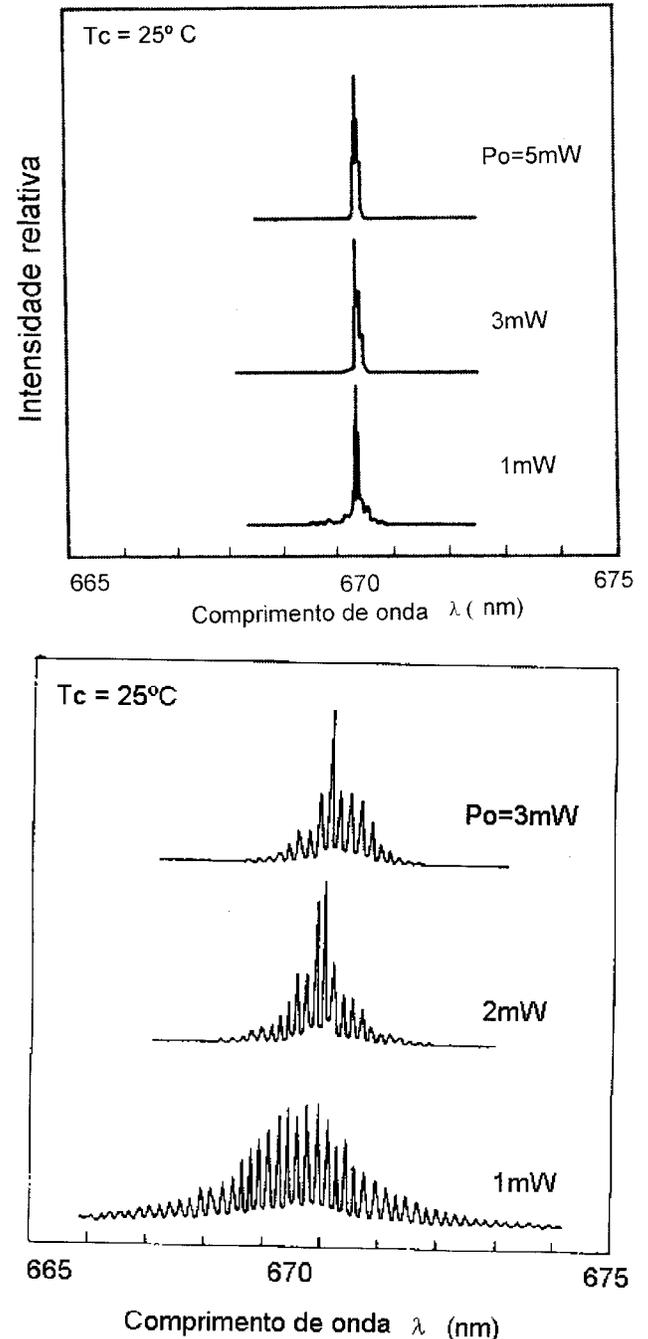


Figura 3. Espectros de emissão dos lasers. (a) laser de ganho guiado (toshiba 9200); (b) laser de índice guiado (toshiba 9211) [4].

emissão espectral - Os comprimentos de onda permitidos numa cavidade Fabry-Perot são dados por:

$$\lambda_m = m2n_g L \quad (3)$$

onde L é o comprimento da cavidade, n_g o índice de refração de grupo, m um número inteiro e λ_m o comprimento de onda do emésimo modo longitudinal da

cavidade. Tipicamente num laser de semiconductor com $\lambda \sim 780\text{nm}$, $n_g=3.5$ e $L=250\mu\text{m}$ logo m é um número maior que 2000 (~ 2240). O espaçamento entre os modos longitudinais da cavidade são dado por:

$$\Delta\lambda = \lambda/2n_gL \quad (4)$$

Tipicamente $\Delta\lambda = 0.3\text{nm}$. A Figura 3 mostra o espectro típico de um laser de índice de refração guiado (parte a) que é monomodo longitudinal e ganho guiado que é multimodo (parte b). Nos lasers multimodo dezenas de modos operam simultaneamente gerando um espectro largo. Para os lasers monocordos a largura de linha depende muito do tipo de laser. Nos lasers de AsGaAl a largura de linha é inversamente proporcional a potência e podendo chegar a uma largura mínima $\sim 10\text{MHz}$. O perfil espectral destes lasers é aproximadamente lorentziano. Os lasers visíveis de InGaAlP monomodo têm largura de linha $\Delta\nu \sim 150\text{MHz}$ o que equivale a um comprimento de coerência $\Delta s = 1/(2\pi\Delta\nu) \sim 30\text{cm}$ enquanto que os lasers multimodo têm comprimento de coerência $\sim 0.5\text{cm}^5$ [4].

sintonizabilidade - uma das características importantes dos lasers de semiconductor é sintonizabilidade, ou seja, a possibilidade de variar o comprimento de onda de emissão do laser. Na maioria das aplicações práticas o laser é sintonizado através da variação de sua temperatura. No semiconductor dependem da temperatura o índice de refração n_g e a largura da banda proibida a qual determina a energia do foton emitido. Consequentemente, o comprimento de onda de cada modo λ_m dado por (3) e a curva de ganho ambos dependem da temperatura. Tanto nos lasers de AsGaAl quanto nos lasers de InAlP, quando a temperatura aumenta, a curva de ganho se desloca para comprimentos de onda mais altos mais rapidamente que os modos da cavidade. Para pequenas variações de temperatura o laser permanece no mesmo modo e λ_m , aumenta continuamente com a temperatura num intervalo $\sim 0.1\text{nm}$ tal como mostra a Figura 4. Entretanto, quando a temperatura aumenta o ganho máximo se desloca para comprimentos de onda maiores. Logo, quando um determinado modo m não tem ganho suficiente para manter sua ação laser o comprimento de onda pula para o modo seguinte ($m+1$) correspondendo a um degrau $\Delta\lambda \sim 0.3\text{nm}$ como mostra a Figura 4. Grandes variações de comprimento

de onda, correspondendo a vários modos longitudinais, podem ser obtidas pela variação da temperatura do laser. Neste caso o comprimento de onda aumentam com uma taxa $\sim 0.25\text{nm}/^\circ\text{C}$ para os lasers de AsGaAl e $\sim 0.20\text{nm}/^\circ\text{C}$ para os lasers de InAlP. Ajustes finos, correspondendo aos patamares da curva da Figura 4 onde o laser não pula de modo, podem ser feitos com taxas de $30\text{GHz}/^\circ\text{C}$. Isto pode ser feito através do ajuste corrente de injeção do laser, ou seja aquecimento via efeito Joule. Para os lasers de AsGaAl e InGaP as taxas são $-3\text{GHz}/\text{mA}$ (ou $\sim +0.064\text{nm}/\text{mA}$ para $\lambda = 800\text{nm}$) e $\sim -7\text{GHz}/\text{mA}$ (ou $+0.10\text{nm}/\text{mA}$ para $\lambda = 670\text{nm}$) respectivamente.

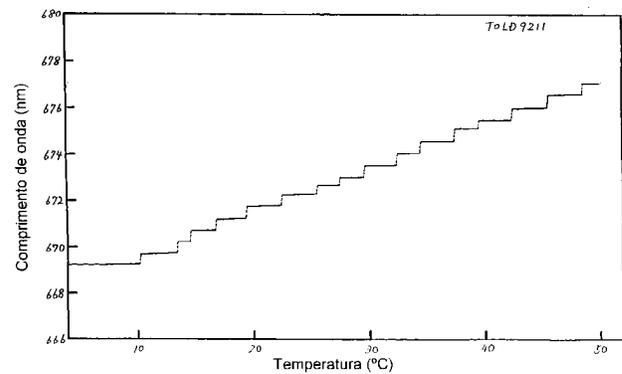


Figura 4. Curva típica de comprimento de onda λ x temperatura (laser Toshiba 9211) [4].

III. Considerações práticas e instrumentação para lasers de semiconductor

Os lasers de diodo de baixa potência (potência menor 50mW) geralmente operam com correntes $\sim 50\text{-}100\text{mA}$. Embora a fonte de corrente necessária seja bastante simples, é preciso ter muito cuidado protegendo o laser contra transientes elétricos. Um breve pulso que aumente muito o fluxo de corrente no laser ou aumente a tensão na junção pode ser fatal ao laser. Desta maneira a fonte de corrente deve ser protegida contra transientes rápidos e a alimentação não pode ser bruscamente interrompida, por exemplo por um mau contato nos terminais do laser. Além disso, o usuário deve ser muito cuidadoso ao conectar o laser pois ele é muito sensível a descargas eletrostáticas, por isso o usuário e o ferro de soldar devem estar aterrados o tempo e a temperatura de soldagem não devem ser elevados, etc.

Os lasers de AsGaAl, que emitem em torno de 800nm , são fabricados há mais tempo, por isso são mais

baratos e têm um desempenho melhor que os lasers visíveis. Atualmente existem lasers visíveis baratos (~25\$) emitem em torno de 670nm com 3mW de potência. Existem modelos mais recentes em 650nm e até 630nm, comprimentos de onda aonde o olho humano é muito mais sensível. Atualmente estes lasers ainda estão relativamente caros mas sua qualidade deve melhorar e o preço cair rapidamente, tal como ocorreu com os laser em 670nm.

fontes de corrente No projeto da fonte de corrente deve-se ter em mente a curva típica de potência x corrente do laser a ser utilizado (Fig.2). Deve-se trabalhar na região linear desta curva para não provocar a morte prematura do laser. Os manuais dos fabricantes fornecem informação sobre os valores típicos de corrente de limiar e corrente de operação (a corrente sob a qual o laser tem a potência especificada). Entretanto, os lasers precisam ser testados individualmente pois existe uma grande flutuação estatística nas suas características. Tomemos como exemplo o modelo 9211 da Toshiba que tipicamente tem $I_{th} \sim 40\text{mA}$ e opera com potência máxima $\sim 4\text{mW}$ em $I_{op} = 50\text{mA}$ (I_{op} é o valor máximo de corrente permitido). A distribuição estatística é relativamente larga por isso, embora a maioria dos lasers apresentem I_{th} entre 35-45 mA os valores extremos desta distribuição são 25 e 60mA [4]. Embora I_{th} varie bastante, em geral temos $I_{op} = I_{th} + 10\text{mA}$, logo um laser que apresente $I_{th} = 25\text{mA}$ deve queimar com correntes maiores que $\sim 35\text{mA}$, enquanto que um laser que apresente $I_{th} = 60\text{mA}$ provavelmente só queimará com correntes superiores a 70mA. Caso o usuário não deseje medir quantitativamente a curva $P \times I$, o valor de I_{th} pode ser estimado por inspeção visual da luz emitida. Para $I < I_{th}$ observa-se uma fluorescência fraca e espacialmente difusa, aumentando-se gradativamente a corrente pode-se observar o valor da corrente na qual o laser “acende” (em geral o erro que se comete estimando I_{th} desta forma é menor que 2mA). Se usuário não dispuser de um medidor de potência recomendamos ajustar a corrente do laser $\sim 5\text{mA}$ acima do valor estimado para I_{th} , sua potência deve ser $\sim 2.5\text{mW}$.

Neste trabalho vamos apresentar algumas fontes de correntes simples (compactas), projetadas como fonte de corrente constante (FCC) e as fontes de potência constante (FPC). A FCC deve fornecer uma corrente

constante para o laser (independente da temperatura). Entretanto, se a corrente for mantida constante a potência emitida pode variar devido a variação de I_{th} com a temperatura. A Figura 2 mostra que I_{th} aumenta com o aumento da temperatura, além disso pode aumentar também com o envelhecimento do laser. Por isso, em muitos casos usa-se uma fonte de potência constante (FPC). Os laser comerciais são encapsulados com um fotodiodo acoplado a sua faceta traseira. Os circuitos de FPC funcionam usando o sinal deste fotodiodo (indicado por PD nas Figuras 6 e 7) para controlar a corrente fornecida ao laser. Apresentaremos em seguida um circuito de FCC e dois circuitos de FPC que podem ser usados em lasers visíveis.

A fonte de corrente constante que estamos usando está esquematizada na Figura 5. A fonte pode ser alimentada por uma bateria de 9V ou uma fonte de tensão comum de 9- 15V. Em geral usamos a fonte de alimentação mais simples (barata) possível, chamada comercialmente de “eliminador de pilha”, que são fontes feitas com apenas um transformador, diodos e um capacitor. O capacitor na base do transistor BD135 serve como “slow starter”, ou seja amortecido o transiente liga/desliga da fonte com um tempo de resposta 0.5seg. Além disso, se a alimentação da fonte for acidentalmente desconectada o “slow starter” impede que a corrente no laser seja bruscamente interrompida o que certamente danificaria o laser. Os diodos em paralelo ao laser (LD na Fig.5) são uma proteção adicional ao laser. Um dos diodos curto-circuita o laser no caso de uma tensão reversa e os 4 diodos limitam a máxima tensão no laser a $\sim 4 \times 0.7\text{V}$ [5]. Embora estes “eliminadores de pilha” tenham um “ripple” relativamente alto $\sim 10\%$, o ripple na corrente do laser é $\sim 1\%$ resultando numa flutuação de potência luminosa no laser de $\sim 1\%$. Isto ocorre porque a fonte produz uma corrente relativamente constante dada por $I \sim 0.6/(R_{eq})$. Onde R_{eq} representa o resistor de 10Ω em paralelo com o outro resistor de 10Ω em série com o trimpot de 100Ω . O trimpot deve ser usado para ajustar individualmente a corrente de cada laser. Medindo-se a corrente no resistor de 1Ω pode-se monitorar a corrente no laser.

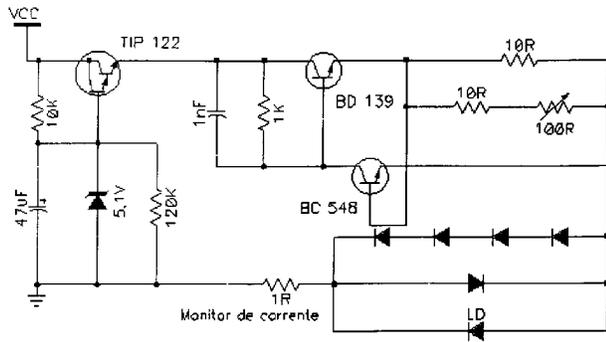


Figura 5. Fonte com corrente estabilizada para lasers de semiconductor, com tensão de alimentação V_{cc} entre 9 - 15 V. No diagrama o laser de diodo é representado por LD.

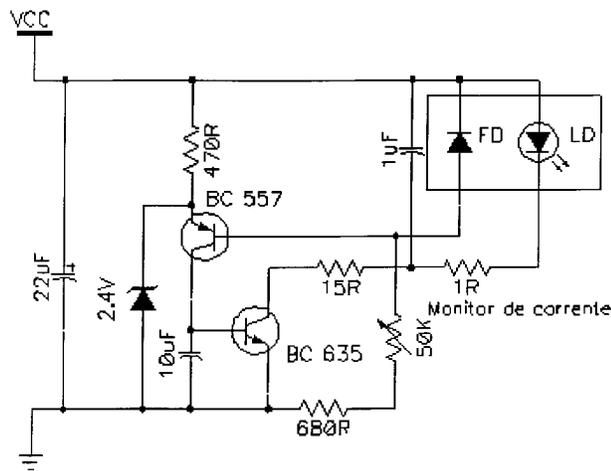


Figura 6. Fonte de alimentação para laser de semiconductor de potência constante (FPC). O circuito estabiliza a potência luminosa tentando manter constante a corrente no fotodiodo (PD) que é proporcional a potência do laser (LD) [4].

A Figura 6 mostra um circuito de FPC. O circuito é alimentado com uma tensão da ordem de 6 Volts. O fotodiodo PD monitora a potência luminosa do laser LD. Um aumento na luminosidade será detectado, diminuindo a tensão no anodo do fotodiodo. Uma vez que o este ponto ligado à base do transistor BC 557 ocorrerá a diminuição da corrente do coletor do mesmo, ocasionando uma diminuição na corrente de base do transistor BC 635. Isto diminui a corrente de coletor deste transistor que é a responsável pelo acionamento do laser. Com isso fecha-se a malha de realimentação desse sistema, mantendo a potência luminosa do laser praticamente constante. O ajuste manual da potência luminosa pode ser feito com o trimpot de 50KΩ em série com o fotodiodo.

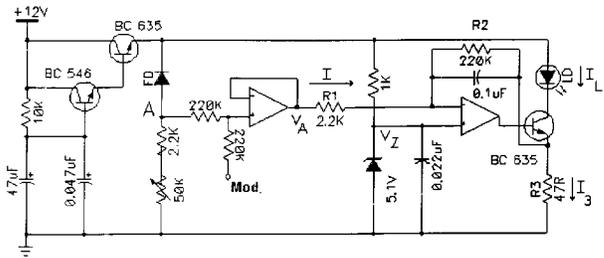


Figura 7. Outro circuito de FPC usando amplificadores operacionais [4].

A Figura 7 mostra um segundo tipo de FPC, que se comporta analogamente ao da Fig. 6. A vantagem deste é a precisão, pois utiliza uma tensão de referência numa das entradas do amplificador operacional. Faremos a seguir uma análise simplificada deste circuito supondo que os amplificadores operacionais são ideais, ou seja: impedância de entrada é infinita e tensão de entrada zero. Neste caso, chamando de I as correntes nos resistores R_1 e R_2 e I_3 a corrente no resistor R_3 , temos:

$$I = \frac{V_A - V_Z}{R_1} = \frac{V_Z - R_3 I_3}{R_2} \quad (5)$$

onde V_A é a tensão no ponto A e $V_Z \sim 5.1V$ a tensão no diodo zener. Desprezando a corrente na base do transistor temos $I_1 = I_3 - I$, onde I_1 é a corrente no laser, logo:

$$I_1 = V_Z \left[\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1 R_3} \right] - V_A \left(\frac{1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1 R_3} \right) \quad (6)$$

A Eq.(6) mostra que I_1 diminui quando a potência luminosa aumenta, diminui a queda de tensão no fotodiodo FD, V_A aumenta. Consequentemente a potência fica estabilizada. A potência de operação do laser pode ser ajustada variando-se V_A através do “trimpot” de 50KΩ. Além disso, este circuito possibilita a modulação da corrente do laser através da entrada de modulação Mod. Os transistores BC 635 e BC 546 funcionam como um “slow starter”, de modo análogo aos da Fig. 5 e 6.

Para verificar o funcionamento destes circuitos fizemos medidas de potência e corrente em função da temperatura do laser. Para isto, colocamos o laser num suporte metálico sobre um elemento termoelétrico (Peltier) usado para esquentar ou esfriar o suporte. A temperatura do laser era monitorada através de um termistor acoplado ao suporte, próximo ao laser. A corrente no laser I , sua potência luminosa P e temperatura

foram coletados via microcomputador, enquanto o laser era aquecido ou resfriado. A Figura 8.a mostra o comportamento do laser com a FCC (vide circuito na Fig. 5) onde observamos que quando a temperatura diminui a potência luminosa aumenta. De (1) e (2) temos:

Os resultados da Fig. 8.a mostram este comportamento exponencial na curva $P \times T$ (com I aproximadamente constante). De acordo com (2) se a temperatura sofre uma variação ΔT , a corrente de threshold I_{th} sofre uma variação $\Delta I_{th}(T) = I_{th}(T)\Delta T/T_0$. De acordo com (1) quando I_{th} varia há uma variação de potência $\Delta P = -\eta_{ex}h\nu\Delta I_{th}$, ou seja:

$$\Delta P(T) = -\eta_{ex}h\nu I_{th}(T)\Delta T/T_0 \quad (7)$$

Para o laser Toshiba 9211 da Figura 8.a temos $I_{th} \sim 40\text{mA}$ ($T = 22^\circ\text{C}$), $T_0 \sim 109\text{K}$, $\eta_{ex}h\nu \sim 0.4\text{mW/mA}$ logo $\Delta P/\Delta T \sim 0.15\text{mWK}^{-1}$ (equivalente a uma variação percentual de $3.7\%\text{K}^{-1}$ quando o laser opera com 4mW). Os resultados experimentais mostrados na Fig. 8.a confirmam esta estimativa apresentando $\Delta P/\Delta T \sim 8.1\text{mWK}^{-1}$ equivalente a $4.2\%\text{K}^{-1}$.

Na Fig.8.b o mesmo laser foi ligado a fonte de potência constante da Fig. 6 e submetido a mesma variação de temperatura da Figura 8.a. Neste caso observamos que com a queda da temperatura a corrente do laser diminuiu de tal forma a manter a potência praticamente constante. Neste caso, houve uma variação de potência de $0,19\%/^\circ\text{C}$, ou seja a potência é da ordem de 20 vezes mais estável que no caso em que a corrente é constante. Na Fig. 8.c mostramos os resultados obtidos com o circuito da Fig. 7, com amplificadores operacionais. Neste caso obtivemos um comportamento ligeiramente mais estável que o da Fig. 8.b, uma variação de potência $\sim 0.16\%/^\circ\text{C}$.

Os circuitos que apresentamos são simples e compactos, ocupando uma área $\sim 10\text{cm}^2$. Isto permitiu a montagem do sistema num tubo de alumínio (1" de diâmetro e 10 cm de comprimento) aonde é colocada a placa da fonte de corrente. A alimentação é feita por uma fonte do tipo eliminador de pilha, que é conectada na traseira do tubo. O suporte do laser de diodo e a lente são rosqueados na parte da frente do tubo. O ajuste da distância entre a lente colimadora (com distância focal $f \sim 5\text{mm}$) e o laser é um pouco crítico.

Por isso, colocamos a lente num suporte com rosca para ajustar esta distância¹.

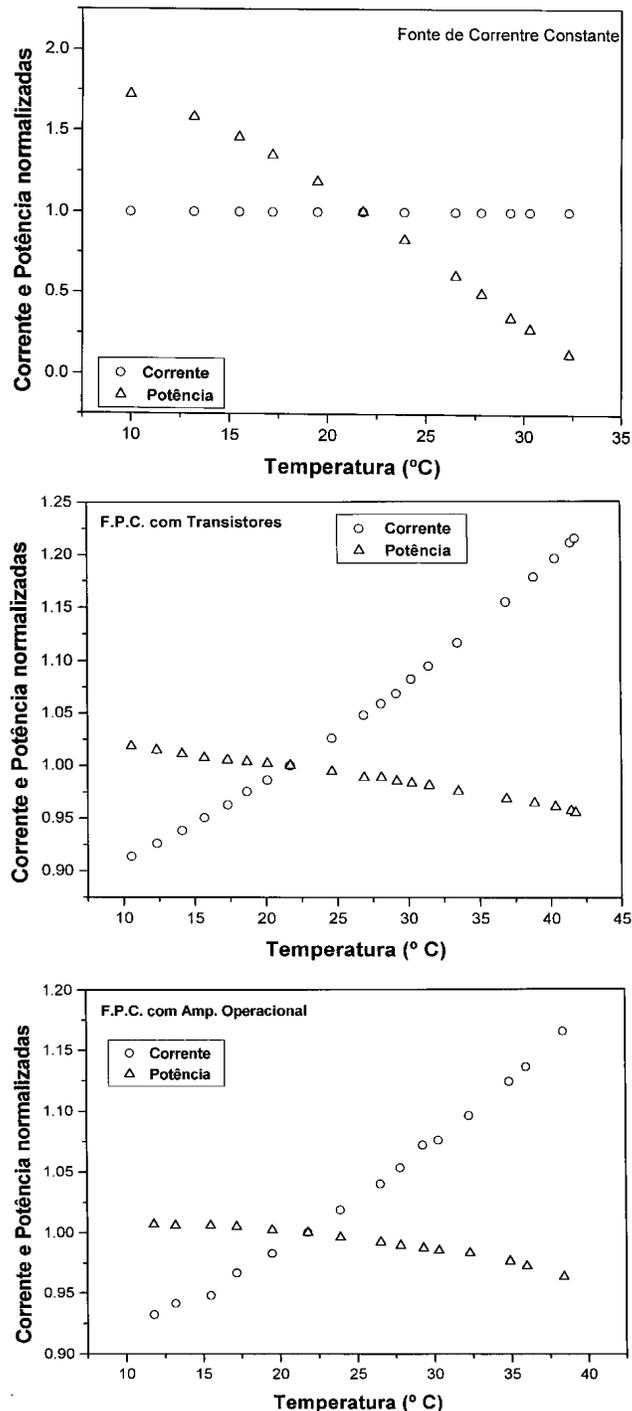


Figura 8. Curvas de potência e corrente (normalizadas) versus temperatura do laser. (a) usando a FCC mostrada na Fig.5, (b) usando a FPC da Fig. 6 e usando a FPC da Fig. 7.

¹ maiores detalhes podem ser obtido em contato com os autores.

IV. Conclusão

Embora os lasers do tipo de ganho guiado sejam satisfatórios em muitas aplicações, os lasers com guiamento de índice apresentam características superiores, com espectro de emissão mais monocromático, melhor modo transversal e menor astigmatismo [3]. Para uso em laboratório de ensino, os lasers de semicondutor têm as seguintes vantagens em relação aos lasers de HeNe: baixo custo, são aproximadamente linearmente polarizados e é fácil modular a intensidade da luz. A desvantagem dos lasers de semicondutor são seu modo transversal assimétrico e seu menor brilho (o olho humano é da ordem de 10 vezes mais sensível a $\lambda = 633$ nm que a $\lambda = 670$ nm).

Nós temos usados estes lasers no curso de ótica básica (com alunos do segundo ano) em experimentos de ótica geométrica, interferência, difração por fendas, redes de difração, polarização, etc. Embora os lasers de ganho guiado tenham menor comprimento de coerência isto somente influencia os experimentos com interferômetros. O uso de lasers de semicondutor em experimentos de absorção saturada em vapores de Cs ($\lambda \sim 850$ nm) e Rb ($\lambda \sim 780$ nm) e lasers com cavidade externa nas referências [5-7].

Referências

1. B. Length, *Laser Focus* **30**, 87 (1994).
2. H. C. Casey, Jr. and M. B. Panish, *Heterostructure Lasers Part A and B*, Academic Press, New York, 1978; A. Yariv, *Quantum Electronics*, 3rd Ed., Wiley, New York, 1989.
3. G. Hatakoshi and Y. Uematsu, "InGaAlP visible-light laser diodes", *International J. Optoelectronics*, **7**, 359 (1992).
4. Laser Diode with Visible Wavelength 650nm to 685nm, Toshiba user's manual.
5. K. B. MacAdam, A. Steinbach, and C. Wieman, "A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback, and a saturated absorption spectrometer for Cs and Rb", *Am. J. Phys.* **60**, 1098 (1992).
6. A. M. Tuboy, S. A. Tonissi Jr, S. C. Zilio e V. S. Bagnato, *Rev. Fís. Apl. e Instrum.*, **5**, 3 (1990); A. M. Tuboy, S. A. Tonissi Jr., M. S. Santos, V. S. Bagnato, *Rev. Fís. Apl. e Instrum.* **6**, 96 (1991).
7. T. Catunda, J. G. Ferreira, M. A. Antônio, A. Sehmman e H. Jiao, *Rev. Fís. Apl. e Instrum.* **9**, 31 (1994); A. M. Tuboy, M. S. Santos e V. S. Bagnato *Rev. Fís. Apl. Instrum* **9**, 1 (1994).