赤色面発光レーザー

波多腰 玄一, 高岡 圭児

(株)東芝 研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー (〒212-8582 川崎市幸区小向東芝町1)

Red VCSELs

Gen-ichi HATAKOSHI and Keiji TAKAOKA

Advanced Discrete Semiconductor Technology Laboratory, Corporate Research & Development Center,
Toshiba Corporation, 1 Komukai Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki 212-8582

(Received June 11, 2001)

Red-light surface-emitting lasers are expected to be applied as compact light sources for optical data links employing plastic optical fibers. InGaAlP red VCSELs have been successfully fabricated. One of the important subjects respecting InGaAlP VCSELs is improvement in temperature characteristics. Reduction of the active region diameter is advantageous in that threshold current is reduced, resulting in a reduction of heat generation. It is also effective for the reduction of thermal resistance, due to the heat dissipation through the upper and side regions. The control of such transverse structure is very important for obtaining high-performance VCSELs. Excellent temperature characteristics were obtained for 666-nm VCSELs with a proton-implanted planar structure.

Key Words: VCSEL, Vertical-cavity surface-emitting laser, InGaAlP, POF data link

1. まえがき

面発光レーザー¹⁻³⁾は、低しきい値動作、高い電力/光変換効率、円形の狭がり角出射光、実装が容易、2次元集積化が可能等の優れた特長があり、光情報処理や光伝送の分野で様々な応用の可能性がある。可視域の0.6 μ m帯で発振する赤色面発光レーザーは、プラスチック光ファイバ(POF)を用いた光データリンク、光メモリ、レーザープリンター等の光源として期待されている。特にPMMA系POFの低損失領域が赤色であることから、POFデータリンク用光源としての期待は高い。これまでにInGaAlP材料を用いた垂直共振器型面発光レーザー(VCSEL)では、630~690nmでの発振が報告されている⁴⁻¹²⁾。VCSELは活性層体積が極めて小さいために低しきい値化が可能であるが、一方高出力化や高温発振は端面発光型に比べると容易ではない。特にInGaAlP系では材料の熱抵抗やキャリアオーバーフロー等の影響が大きく、温度特性の確保は重要な課題の一つである。

波長666nmのInGaAlP系面発光レーザーで、60°Cでの連続発振が達成された。高速変調が可能であり、POFデータリンク用光源に適用可能であることが確認できた¹²⁻¹⁷⁾。広がり角の小さい円形出射ビームの得られる赤色面発光レーザーはPOFへの光結合も容易であり、低価格の高速データリンクに適した光源である。以下では赤色VCSELの構造設計、素子特性について述べる。

2. 赤色面発光レーザーの構造と諸特性

面発光レーザーの電流狭窄構造としては、選択酸化型およびプロトン注入型が一般に用いられている。我々は両者の構造のInGaAlP系VCSELを試作し、いずれの構造においても50°C以上での連続発振の実現に成功した¹²⁻¹⁴⁾。プロトン注入型赤色VCSELの構造例をFig.1に示す。後述するように、図に示した電流注入径Dは素子特性に大きく影響するパラメータである。

共振器を構成する分布ブラッグ反射鏡(DBR)には各光学膜厚が四分の一波長のGa_{0.5}Al_{0.5}As/Ga_{0.05}Al_{0.95}As多層膜を用いている。面発光レーザーで必要の高反射率を確保するために、n側、p側とも数十対の多層膜となるため、各へ

Fig.1 Configuration of proton-implanted red VCSEL.

テロ界面のわずかな電圧降下が全体では大きな素子抵抗の原因となる。この電圧降下を低減するため、多層膜界面には組成を連続的に変化したグレーデッド層を設けている。Fig.2はグレーデッド層の効果を計算機シミュレーションにより定性的に示したものである。急峻な界面の場合には、n-DBR, p-DBRいずれの場合もヘテロ障壁高さが大きく、電流が流れ難いのに対し、グレーデッド層を設けた界面では容易に電子電流、正孔電流が流れることがわかる。この効果は特にp-DBRで顕著である。

実際に試作した素子の電流-電圧特性をFig.3に示す。電流注入径Dが小さい程素子抵抗は大きくなり、 $D = 10\mu\text{m}$ の素子では微分抵抗の値は 100Ω 以上であるが、電流注入面積と微分抵抗との積としては、従来のLEDと同じオーダー

Fig.2 Simulation example for the effect of graded layer at the DBR interfaces.

Fig.3 Measured current-voltage characteristics of red VCSELs.

の値が得られており、グレーデッド層の効果が現れていると考えられる。

測定された発振スペクトルおよび遠視野像強度分布の例をそれぞれFig.4およびFig.5に示す。遠視野像広がり角の半値幅は 6.6° と小さく、また図のように円形の出射ビームが得られている。このような出射光は、コア系の大きいプラスチックファイバーに容易に結合させることができる。

赤色VCSELの高速変調特性をFig.6に示す。この図は1.2 Gbpsの擬似ランダム信号で変調した場合のアイパターンの測定結果で、測定系が必ずしも最適化されていないが、1 Gbps以上での高速変調が可能といえる。

3. 赤色面発光レーザーの温度特性

最初に述べたように、赤色VCSELでは温度特性が重要課題の一つであるので、ここで少し詳しく述べる。連続発振

Fig.4 Oscillation spectrum.

Fig.5 Measured far field profile for the output beam of red VCSEL.

Fig.6 Measured eye pattern for red VCSEL driven at 1.2 Gbps NRZ signal.

時における電流－光出力特性の温度依存性をFig.7に示す。図からわかるように、温度特性は電流注入領域の径 D に大きく依存している。 D が $10\mu\text{m}$ の素子では発振しきい値が 2.5mA 、最高発振温度は 60°C であった。径が大きくなると共にしきい値は上昇し、最高発振温度は低くなる。室温でのしきい値としきい電流密度の電流注入領域面積 S に対する依存性をFig.8に示す。電流密度は、面積の小さい領域では電流広がり導波損失により、また面積の大きい領域では電流注入不均一にそれぞれ起因して若干増加しているが、約 2 kA/cm^2 の値ではほぼ一定である。このため、しきい値は電流注入面積にほぼ比例している。

Fig.7に示した温度特性の電流注入径 D に対する依存性をFig.9およびFig.10に示す。Fig.10からわかるように、最高発振温度 T_{max} は電流注入径 D が小さくなるにつれて、ほぼ線

Fig.7 Temperature dependence of I-L characteristics.

Fig.8 Threshold current and threshold current density as a function of current aperture area.

形に増加している。このような特性と、素子の熱抵抗および発振しきい値との間には大きな相関がある。したがって、VCSELではしきい値を低減する構造設計と共に、熱抵抗低減のための設計が特に重要である。

プロトン注入型赤色VCSELにおける電流分布および熱流分布の計算機シミュレーション例¹⁶⁾をFig.11に示す。上述のように面発光レーザーでは、電流注入領域の大きさがデバイス特性に影響する重要なパラメータである。基本モード発振には活性層の電流注入領域を小さくする必要があるが、これは同時に熱流の広がりによる熱抵抗低減の効果があり(Fig.11(b)), 素子の温度特性にも大きく影響する。

熱流の広がり効果¹⁷⁾に関するシミュレーション結果をFig.12に示す。Fig.12(a)のように発光領域(発熱源)が小さい場合は熱が活性層領域の横および上の領域にも広がってヒートシンクへ流れるのに対し、Fig.12(b)のように発光領域面積が大きい場合にはその効果は小さい。

熱の流れが1次元的にヒートシンクへ流れるとすると、熱抵抗は熱源面積に反比例することになるが、Fig.13に示したように、計算機シミュレーションによると、熱抵抗は熱源面積ではなく、熱源の直径(すなわち面積の平方根)にほぼ反比例することがわかった。これは上述したように熱源面積が小さい程、熱広がり効果が大きいためである。一方、Fig.8に示したように発振しきい値は面積にほぼ比例しているため、発生する熱は発光面積に比例すると考えられる。したがって、発生熱×熱抵抗で与えられる活性層温度上昇は発光面積径に比例することになり、これはシミュレーションでも確認された(Fig.14)。Fig.10に示した最高発振温度の電流注入径に対する依存性は、このメカニズム

Fig.9 Temperature dependence of the threshold current.

Fig.10 Maximum CW temperature as a function of current aperture size.

Fig.11 Calculated examples for current distribution (a) and heat flow (b) in proton-implanted VCSEL.

Fig.12 Heat flow simulation for InGaAlP red VCSELs. (a) Small heat generation area. (b) Large heat generation area.

Fig.13 Calculated thermal resistance as a function of diameter D.

を反映しているものと考えられる。

4. あとがき

InGaAlP系材料を用いた赤色面発光レーザーの構造設計と特性について述べた。構造が簡単な平板型プロトン注入電流狭窄構造VCSELで、波長666nmにおいて、しきい値2.5mA、最高発振温度60°Cが得られた。さらなる温度特性向上に向けたデバイス設計では、低しきい値化、熱抵抗低減が特に重要である。半導体レーザーとしての高性能特性と、LEDと同様の実装容易性を兼ね備えた赤色面発光レーザーは、低価格・高速データリンク用光源として有望

Fig.14 Calculated temperature rise in the active layer.

なデバイスである。

参考文献

- 1) K. Iga, F. Koyama, and S. Kinoshita: IEEE J. Quantum Electron. **24** (1988) 1845.
- 2) 伊賀 健一, 小山 二三夫: 電子情報通信学会誌 **80** (1997) 687.
- 3) K. D. Choquette and H. Q. Hou: Proc. IEEE **85** (1997) p.1730.
- 4) J. A. Lott and R. P. Schneider, Jr.: Electron. Lett. **29** (1993) 830.
- 5) K. Tai, K. F. Huang, C. C. Wu, and J. D. Wynn: Electron. Lett. **29** (1993) 1314.
- 6) R. P. Schneider, Jr., K. D. Choquette, J. A. Lott, K. L. Lear, J. J. Figiel, and K. J. Malloy: IEEE Photonics Tech. Lett. **6** (1994) 313.
- 7) K. D. Choquette, R. P. Schneider, M. H. Crawford, K. M. Geib, and J. J. Figiel: Electron. Lett. **31** (1995) 1145.
- 8) M. H. Crawford, R. P. Schneider, Jr., K. D. Choquette, and K. L. Lear: IEEE Photonics Tech. Lett. **7** (1995) 724.
- 9) Y. H. Chen, J. Woodhead, J. P. R. David, C. C. Button, M. Hopkinson, J. S. Roberts, T. E. Sale, and P. N. Robson: Mat. Sci. Eng. **B35** (1995) 12.
- 10) J. A. Lehman, R. A. Morgan, D. Carlson, M. H. Crawford, and K. D. Choquette: Electron. Lett. **33** (1997) 298.
- 11) R. Stevens, R. Marcks Von Wurtemberg, R. Schatz, and K. Streubel: Proc. Int. POF Conf'99 (Makuhari Messe, Chiba, 1999) paper PJ4.
- 12) K. Takaoka, H. Furuyama, M. Ishikawa, G. Hatakoshi, H. Saito, M. Sugizaki, and H. Tamura: Proc. Int. POF Conf. '99 (Makuhari Messe, Chiba, 1999) paper PPD4.
- 13) K. Takaoka, M. Ishikawa, and G. Hatakoshi: Proc. APCC/OECC'99 (Beijing, 1999) paper PD-2.
- 14) K. Takaoka, M. Ishikawa, and G. Hatakoshi: Proc. OECC2000 (Makuhari Messe, Chiba, 2000) paper 14C2-5.
- 15) K. Takaoka, M. Ishikawa, and G. Hatakoshi: Conf. Digest, 2000 IEEE 17th International Semiconductor Laser Conf. (Monterey, 2000) paper p.15.
- 16) G. Hatakoshi, K. Takaoka, and M. Ishikawa: Proc. IEEE/LEOS 2000 Annual Meeting (Rio Grande, 2000) paper ThF1.
- 17) 波多腰 玄一, 高岡 圭児: レーザー学会学術講演会第21回年次大会講演予稿集 (2001) 208.