励起準位を用いた面発光レーザーの動作温度範囲拡大

角田 健, 宮本 智之

東京工業大学 精密工学研究所 (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259-R2-39)

Expansion of Operating Temperature Range of VCSELs Using Excited Quantized Level

Ken TSUNODA and Tomoyuki MIYAMOTO

Precision and Intelligence Lab., Tokyo Institute of Technology, R2-39, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8503

(Received March 24, 2015)

The operating temperature range expansion of the vertical cavity surface emitting semiconductor lasers (VCSELs) was investigated by the optical gain spectral broadening method applying the excitation quantized level of the quantum well. From the design of the quantum well structure using the excitation level, the well width of 11–13 nm is appropriate in AlGaAs/GaAs system. Two types of VCSELs using the excitation level were fabricated based on the numerical design. The operation temperature range difference of $\Delta T = 269^\circ\text{C}$ and 275°C were observed by a low temperature range design and a high temperature range design devices, respectively.

Key Words: Semiconductor laser, VCSEL, Temperature characteristics, Quantum well, Excitation quantized level

1. はじめに

半導体レーザーの一つである垂直共振器型面発光レーザー (Vertical Cavity Surface Emitting Laser: VCSEL)¹⁾ は、低電力、単一縦モード、2次元アレーといった特徴から、近年その応用範囲は、通信、センシング、イメージング、エネルギーなど多様化している。この中でも、自動車内における光通信²⁾や、風力発電における安全装置のセンシング³⁾、人工衛星内通信⁴⁾など、これまで実用化されている室内利用の短距離光通信やレーザーマウスなどの応用とは異なる、過酷な条件でVCSELを用いる研究開発が活発化している。このような多様かつ過酷な環境での利用を踏まえると、光源にはこれまでよりも非常に広い温度範囲の動作が必要になると考えられる。例えば、車載では車室内搭載で $-40\sim 80^\circ\text{C}$ 、エンジンルーム内搭載で $-40\sim 120^\circ\text{C}$ が求められ、他の過酷な環境も同等範囲以上の動作が要求される。

半導体レーザーの温度特性は、利得スペクトル特性に強く依存するが、利得スペクトルのピーク特性だけを考えれば、極低温(77 K以下)から 200°C 以上の温度差 300°C を超える非常に広い温度範囲で動作可能である⁵⁾。このためほぼ利得ピーク波長で発振するファブリペローレーザーは、縦モード跳び(モードホップ)は生じるが、非常に広い温度範囲で動作可能である。しかし、VCSELを含む単一縦モード動作レーザーは、発振波長と利得スペクトルの波長関係が温度により大きく変化し、動作可能な温度範囲は温度差 $100\sim 150^\circ\text{C}$ 程度と狭く

なる。

動作温度範囲拡大には、主に2つの手法がある。1つは利得スペクトル帯域の有効利用であり、低共振器損失で低利得範囲を利用するか、利得を大きくする。損失低減は他の特性改善にも有効だが⁶⁾、低減余地は小さい。利得増加には多重量子井戸化が有効である^{7,8)}。ただしVCSELは、1波長相当の λ 共振器を構成し、光の定在波の腹に量子井戸を設置するために、井戸数は最大3–5層に制限される。歪量子井戸も利得増加に有効だが^{9,10)}、多重化による歪蓄積が課題である。もう1つは利得スペクトル帯域の拡大であり、異なる波長の量子井戸の積層が報告されている^{11,12)}。ただし、最長波長の井戸は1層分となってしまう、利得低下によるレーザー特性劣化要因になる。また、厚い2 λ 共振器を用いた井戸数増加による動作温度範囲拡大も報告されているが¹³⁾、各井戸層へのキャリア不均一注入や光子寿命増加による高速変調制限などが課題となる。このため通常のVCSEL構造を出来るだけ維持した、量子井戸多重化とは異なる利得増加あるいは利得スペクトル帯域増加が必要である。その他に、MEMS構造として形成した梁上の反射鏡の変位による共振波長制御法を応用し、温度によらず利得スペクトルピーク波長で動作する手法が検討されている。デバイス構造は複雑だが、ファブリペローレーザーに近い特性となるため、実際の動作報告が待たれる¹⁴⁾。

本研究では、井戸数を増加せずに実効的な利得スペクトル特性を改善する量子井戸の励起準位利用を提案し、面発光レーザーの動作温度範囲として、実験的に温度差

250°C以上を達成したので報告する。第2節では、励起準位利用量子井戸の基本設計を述べ、第3節では、利得特性としきい値電流の解析結果を示す。第4節で面発光レーザーの製作とその評価結果を示し、第5節で結論を述べる。

2. 励起準位利用による利得スペクトル帯域拡大

2.1 励起準位利用量子井戸の設計指針

通常のVCSELは、Fig. 1のように共振波長を室温近傍で利得ピーク近くに設計する。高温では、バンドギャップエネルギー(E_g)が減少し、利得スペクトル(λ_g)は長波長シフトする。このため共振波長の利得が減少するので、しきい値利得(g_{th})を得るために注入キャリア密度(N)の増加が必要である。さらに高温になると、キャリア漏れや自己発熱のため利得増加が抑制され発振が不可となる。一方、低温では λ_g が短波長化することで、共振波長の利得が得られなくなり発振が不可となる。なお、詳細には利得スペクトルは温度係数0.3 nm/K程度で変化するが、同時に共振波長も温度係数0.07 nm/K程度で変化する。

以上の利得特性において、量子井戸の短波長側利得を増加できれば、高温でのキャリア密度増加を抑制できる。エネルギー分布はフェルミ・ディラック分布になるので、短波長側利得の増加には状態密度の増加が必要である。そこで励起準位エネルギーの状態密度が基底準位の2倍相当になることを利用する。この場合でもエネルギー分布が影響するので、基底準位と励起準位間のエネルギー差の設定が重要になる。Fig. 2に基底準位と励起準位のエネルギー差 ΔE_{12} と利得帯域の関係を概念図で示す。

Fig. 1 Schematic relation between lasing wavelength and gain spectra in VCSEL. Blue line shows gain at room temperature, and red lines show gain at high temperature.

Fig. 2 Schematic gain spectra for various carrier injection level. (a) large excited level energy, (b) suitable excited level energy, (c) small excited level energy.

す。

Fig. 2 (a)は ΔE_{12} が大きい場合で、通常の量子井戸の設計に相当する。基底準位のみキャリアが蓄積するため、低注入キャリア密度で利得を得られるが、励起準位利得を得るには非常に大きな注入キャリア密度が必要になるので、実効的には基底準位に基づく利得スペクトル帯域になる。

Fig. 2 (b)は ΔE_{12} が適度な大きさの場合で、比較的小さいキャリア密度で励起準位利得が得られ、基底準位利得と合わせて利得スペクトルの広帯域化が可能になる。

一方で、Fig. 2 (c)のように ΔE_{12} が小さい場合は、利得スペクトル帯域の拡大は十分に出来ない。

2.2 励起準位利用井戸構造の設計

励起準位の制御には、井戸幅とバリア高さをを用いる。特にバリア高さは、励起準位からバリア層へのキャリア漏れの影響も考慮する必要がある。

Fig. 3は、製作する面発光レーザーを想定したAlGaAs/GaAs系量子井戸について、横軸にAlGaAsバリア層のAl組成を、縦軸にGaAs井戸幅を取り、遷移波長をカラーマップで示した。遷移波長は伝導帯と価電子帯の第1励起準位間エネルギーとして求めた。量子化エネルギーは有効質量近似より求め、材料物性は参考文献(15)の値を用いた。なお、次の議論は、価電子帯の基底-励起準位間エネルギーは比較的に小さいため、伝導帯のみを考慮した。

フェルミ・ディラック分布を考慮すると、伝導帯の基底-励起準位間エネルギー(ΔE_{c12})は $2-3kT$ (0.05-0.08 eV)が適切である。なお、 k はボルツマン定数、 T は室温程度を考えている。バリア層へのキャリア漏れ抑制には、励起準位(E_{c2})とバリア端(E_{cb})の差($E_{cb}-E_{c2}$)が0.1 eV程度が必要と考える。結果として、影を付けた範囲が励起準位利用に適当な構造と考えられ、井戸幅11-13 nmと通常の量子井戸の6-8 nmに比べて1.5倍ほど厚い。なお、井戸層の材料により制御は可能だが、井戸幅が制限されるため、通常の量子井戸よりも特に長波長への発光波長

Fig. 3 Transition wavelength of excitation level. Suitable structure is shown as shaded blue area and solid circles shows fabricated structures.

拡大は制限される。

3. 励起準位利用構造の利得としきい値特性解析

3.1 利得スペクトルの理論解析

井戸構造の設計をもとに、まず利得スペクトルを解析した。例として、Fig. 4に $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ で井戸幅11 nmの構造について、注入キャリア密度 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の解析結果を示す。また、通常の量子井戸相当として、井戸幅8 nmの結果も示した。なお、量子井戸の利得スペクトルは、式(1)で解析した¹⁶⁾。

$$G(N, E) = \frac{E}{n\hbar} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \int_0^\infty R_{ch}(E_{cv})^2 \cdot g_{cv}(E_{cv}) \times \left\{ f_c(E_{cv}) - f_v(E_{cv}) \right\} \frac{\hbar/\tau_{in}}{(E - E_{cv})^2 + (\hbar/\tau_{in})^2} dE_{cv} \quad (1)$$

ここで、 G は線形利得定数、 N はキャリア密度、 E は光子エネルギー、 n は屈折率($n=3.6$)、 $\hbar$ はプランク定数、 μ_0 は真空透磁率、 ϵ_0 は真空誘電率、 E_{cv} はキャリア遷移エネルギー、 R_{ch} は遷移行行列要素、 g_{cv} は換算状態密度、 f_c と f_v は伝導帯と価電子帯の擬フェルミレベルに対するフェルミ・ディラック分布関数、 τ_{in} はバンド内緩和時間($\tau_{in}=0.1 \text{ ps}$)である。

Fig. 4より励起準位利用構造(11 nm)の ΔE_{12} は通常構造(8 nm)よりも小さくなり、比較的低注入キャリア密度から励起準位の利得が大きくなる。さらに、通常構造では励起準位と基底準位の間の利得の低下が大きい。これはフェルミ・ディラック分布関数形状とダイポールモーメントのエネルギー依存性に基づくが、この利得低下領域をしきい値利得に高めるにも、注入キャリア密度の増加が必要になる。以上から、励起準位を適切に利用する量子井戸構造により、広い利得スペクトル帯域を過剰な注入キャリア密度の増加なく得られることがわかる。

3.2 励起準位利用VCSELのしきい値特性

利得特性からVCSELのしきい値電流密度の温度特性を理論解析した。解析では、注入キャリアのバリア層への漏れも考慮した。具体的には、伝導帯の量子井戸内の擬フェルミレベルをバリア層にも延長して漏れキャリア

Fig. 4 Gain spectrum of (bold line) 11 nm quantum well and (thin line) 8 nm well.

を考慮した。ただし簡易のため、井戸とバリアにおける電子とホールキャリア密度不均衡によるポテンシャル変形は考慮していない。共振器構造は、平均反射率99.74%、吸収損失と回折損失はそれぞれ 10 cm^{-1} とし、これらの温度依存性はないものとした。また、井戸数は3とし、光閉じ込め係数への定在波分布の影響を考慮した。

しきい値電流密度には、共振波長と利得スペクトルの波長関係(波長オフセット)も影響する。そこでさまざまな共振波長設定に対する、しきい値電流密度の温度依存性を解析した。Fig. 5に室温で設定する共振波長を縦軸に、横軸を温度とした、しきい値電流密度の解析結果をカラーマップで示す。

発振動作上限を 6 kA/cm^2 と考えると、共振波長を室温で基底準位に設定した構造に相当するグラフ上端では、室温近傍から 250°C 程度まで動作可能となり、高温側に適した設計といえる。一方、共振波長を室温で励起準位近傍に設定した構造に相当するグラフ下端では、 -200°C 程度から 100°C 程度まで動作可能となり、低温側に適した設計となる。このように利用する温度帯域により、適切な構造の設定にすることで、温度差 200°C 以上の動作温度範囲の拡大が期待できる。なおグラフには、長波長に共振波長を設定した場合に、温度 100°C 近傍で、基底準位から励起準位への発振波長移行によるしきい値電流密度の一旦低下が示唆されている。ただし、これは共振器特性によっては明瞭にならない。

4. 励起準位利用構造デバイスの製作と特性評価

4.1 低温側温度範囲拡大構造のレーザー特性

設計を基本に、まず低温側温度範囲拡大構造のVCSELを製作および特性評価した。ウェハ構造は半導体の多層膜反射鏡(Distributed Bragg Reflector: DBR)を $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 組成で下部40.5ペア、上部25ペアとし、活性層は $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ で井戸幅11 nmの4井戸層とした。室温における共振波長は第一励起準位近傍(808 nm)とした。なお、活性層直上のDBRに

Fig. 5 Analysis of threshold current density of VCSEL using excited level. High temperature range shows high threshold current density.

$\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ の選択酸化層30 nmを1層挿入した。製作プロセスは我々の通常のVCSEL製作プロセスを適用し、メササイズ30 μm 角、非酸化開口径5-6 μm 、光出射窓10 μm 角とした。測定はcwとした。

低温環境における測定は、液体窒素を用いて-196°Cから0°C近傍まで評価し、それ以上の温度範囲は温風機で加熱し評価した。Fig. 6に測定した電流-光出力特性の例を示す。しきい値を持つレーザー発振動作が得られ、測定電流範囲のほとんどで0.5 mW以上の出力が得られている。

また、光出力特性からしきい値電流を抽出した結果をFig. 7に示す。-196°Cから73°Cまでの発振が得られ、動作温度範囲として温度差269°Cであった。また、全温度範囲で2.5 mA以下の低しきい値電流動作となり、最大と最小のしきい値電流の比として2.3という小さなしきい値変動であった。

ここで、本デバイスは広い温度範囲で動作させるため、設定した共振波長以外へのモードホップの可能性も検討する必要がある。Fig. 8にスペクトルの温度特性の測定結果を示す。高温ほど発振波長が長波長にシフトしているが、単一縦モードとして発振が得られていることを確認した。Fig. 9に発振波長の温度依存性を示す。発振波長はほぼ単調増加していることがわかる。-91°C

Fig. 6 I-L characteristics of low temperature range design device under various temperature.

Fig. 7 Threshold current characteristics of low temperature range design device.

から31°Cの範囲を直線近似すると0.059 nm/Kとなる。一方、-150°C以下の範囲で発振波長の変化率が減少しているが、これは、バンドギャップエネルギーの温度変化を表すバルシューニの経験式¹⁷⁾から、バンドギャップの変化が低温域で減少する効果が屈折率にも影響していることのほか、スペクトル測定において、デバイスに付着した液体窒素の残留のために、デバイスと温度測定部の間にわずかに温度差が生じた可能性もあると考えている。

4.2 高温側温度範囲拡大構造のレーザー特性

次に、高温側温度範囲拡大構造のVCSELを製作および評価した。ウェハ構造は、DBRは $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 組成で下部40.5ペア、上部21ペアとし、活性層は $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$ で井戸幅12 nmの4井戸層とした。共振波長は基底準位の波長(856 nm)から10 nm短波側に設計し、室温以下もある程度の温度範囲の動作を可能とした。プロセスとデバイスサイズは、低温側温度範囲拡大構造と同等で、非酸化開口径は6 μm である。測定はcwとした。

低温側は液体窒素を用いて-196°Cから、高温側はセラミックヒーター上にデバイスを搭載したマウントを設置して、150°C以上まで評価可能とした。Fig. 10にしきい値電流の測定結果を示す。なお、低温側測定と高温側測定で、同一ウェハで同一プロセスに基づくが、異なる

Fig. 8 Spectrum characteristics of low temperature range design device. The lasing wavelength at high temperature is long.

Fig. 9 Temperature characteristics of lasing wavelength of low temperature range design device.

Fig. 10 Threshold current characteristics of high temperature range design device. Two kind of markers show measurement results under different system.

デバイスの測定結果を示している。このデバイス間の特性の違いは十分小さいと考えている。20°C近傍のしきい値の跳びは、低温側測定において、測定系への結露による水分が不要な電流パスになったことが原因と考えている。

Fig. 10より-140°Cから135°Cまでの温度差275°Cの発振となった。全温度範囲でしきい値電流3.5 mA以下で、しきい値の最大と最小の比2.9と少ない変化であった。なお、共振波長を基底準位から-10 nmのオフセットとしたが、想定よりも低温側に動作範囲が拡大した。これは、ウェハ製作誤差に加え、ウェハ製作の基準としたフォトルミネッセンスピーク波長と基底準位量子化エネルギーにはわずかな波長差があることが影響したと考えている。

Fig. 11に発振波長の温度依存性を示す。高温側温度範囲拡大構造デバイスにおいてもモードホッピングは確認されず、-134°Cから20°Cの温度特性は0.053 nm/K、23°Cから135°Cの温度特性は0.076 nm/Kであった。

Fig. 12は、スロープ効率の測定結果である。低温側は結露の出力測定への影響を抑制するため、冷却アルコール中にデバイスを浸した。結果から、-80°C程度から100°C程度の広い温度範囲で少ない変動が得られた。な

Fig. 11 Temperature characteristics of lasing wavelength of high temperature range design device. Two kind of markers show measurement results under different system.

Fig. 12 Temperature characteristics of slope efficiency of high temperature range design device. Two kind of markers show measurement results under different system.

Fig. 13 Comparison of operation temperature range.

お、20°C近傍の値の跳びは測定系の調整の影響、-20°C近傍の値の異常は、迷光によるノイズが原因と考えている。

4.3 報告事例との比較

Fig. 13に本研究で得られた動作温度範囲と、比較的広い温度範囲のVCSEL動作を報告している他研究機関の例を示す。

励起準位を利用する本研究の結果は、歪量子井戸を含む多重量子井戸構造⁷⁻¹⁰⁾に比べて動作温度範囲は拡大できたと考えている。一方で、異なる量子準位の井戸層を積層するチャープ井戸構造^{11,12)}や、2 λ 共振器構造¹³⁾に比べると、動作温度範囲は同等か若干狭い。ただし、100°Cを超える高温側の動作を達成している。さらに、高温側の動作については、実効的な井戸数の多い本手法では有利であり、波長オフセットの調整により200°Cを超える動作も可能と考えている。

5. 結 論

励起準位を利用した利得スペクトル拡大による面発光レーザーの動作温度範囲拡大を検討した。

励起準位利用の量子井戸設計では、AlGaAs/GaAs系で井戸幅11-13 nmが適当であることを明らかにした。また、励起準位利用VCSELの構造設計と性能予測を行い、しきい値電流密度6 kA/cm²を発振上限と考えると、低温側動作温度範囲拡大構造で温度差 $\Delta T = 300^\circ\text{C}$ 、高温側動作温度範囲拡大構造で温度差 $\Delta T = 250^\circ\text{C}$ の温度範囲が期

待できることを示した。実際に製作したデバイスにより、低温側動作温度範囲拡大構造で温度差 $\Delta T = 269^{\circ}\text{C}$ 、および高温側動作温度範囲拡大構造で温度差 $\Delta T = 275^{\circ}\text{C}$ の単一縦モード動作を確認した。

以上より、励起準位の利用がVCSELの動作温度範囲拡大手法として有効であることを示した。今後、量子井戸構造の詳細な最適化とともに共振器損失の低減などを行うことで、より広い温度範囲での動作が可能になると期待できる。

謝 辞

デバイス製作においてご協力いただいた東京工業大学半導体MEMSプロセス技術センターの松谷晃宏博士に感謝する。

参考文献

- 1) K. Iga: IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **6** (2000) 1201.
- 2) T. Kibler, S. Pöferl, G. Bock, H.-P. Huber, and E. Zeeb: J. Light-wave Technology **22** (2004) 2184.
- 3) K. Worms, C. Klamouris, F. Wegh, L. Meder, D. Volkmer, S. P. Philipps, S. K. Reichmuth, H. Helmers, A.W. Bett, J. Vourvoulakis, *et al.*: Proc. Sensors and Measuring Systems (2014) p. 1.
- 4) R. F. Carson, M. E. Warren, J. R. Joseph, T. Wilcox, D. J. Abell, and K. J. Otis: Proc. SPIE **9226** (2014) 92260H.
- 5) T. Kageyama, K. Takada, K. Nishi, M. Yamaguchi, R. Mochida, Y. Maeda, H. Kondo, K. Takemasa, Y. Tanaka, T. Yamamoto, *et al.*: Proc. SPIE **8277** (2012) 82770C.
- 6) R. Jäger, M. Grabherr, C. Jung, R. Michalzik, G. Reiner, B. Weigl, and K. J. Ebeling: Electron. Lett. **33** (1997) 330.
- 7) B. Tell, K. F. Brown-Goebeler, R. E. Leibenguth, F. M. Baez, and Y. H. Lee: Appl. Phys. Lett. **60** (1992) 683.
- 8) G. Goncher, B. Lu, W.L. Luo, J. Cheng, S. Hersee, S. Z. Sun, R. P. Schneider, and J. C. Zolper: IEEE Photon. Technol. Lett. **8** (1996) 316.
- 9) A. Mutig, G. Fiol, P. Moser, D. Arsenijevic, V. A. Shchukin, N. N. Ledentsov, S. S. Mikhlin, I. L. Krestnikov, D. A. Livshits, A. R. Kovsh, *et al.*: Electron. Lett. **44** (2008) 3105.
- 10) D. K. Serkland, K.M. Geib, G. M. Peake, G. A. Keeler, and A. Y. Hsu: Proc. SPIE **8276** (2012) 82760S.
- 11) M. Kajita, T. Kawakami, M. Nido, A. Kimura, T. Yoshikawa, K. Kurihara, Y. Sugimoto, and K. Kasahara: IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **1** (1995) 654.
- 12) G. G. Ortiz, C. P. Hains, B. Lu, S. Z. Sun, J. Cheng, and J. C. Zolper: IEEE Photon. Technol. Lett. **8** (1996) 1423.
- 13) Y. A. Akulova, B. J. Thibeault, J. Ko, and L. A. Coldren: IEEE Photon. Technol. Lett. **9** (1997) 277.
- 14) H. Sano and F. Koyama: IEICE Electron. Express **6** (2009) 883.
- 15) 赤崎 勇: III-V族化合物半導体 (培風館, 1994) p. 150, p. 187, p. 188.
- 16) M. Asada, A. Kameyama, and Y. Suematsu: IEEE J. Quantum Electron. **20** (1984) 745.
- 17) Y. P. Varshni: Physica **34** (1967) 149.