

# QCLの効率を約2倍に高める深い井戸

従来式の量子カスケードレーザ(QCL)のコアは固定された組成の半導体量子井戸と障壁から構成されている。残念ながら、4.5~5.5 $\mu\text{m}$ の中赤外(MIR)発光QCLデバイスの場合、この構成はキャリア漏れを引き起こす。このキャリア漏れはデバイスコアの30~40の各活性領域における上部レーザ発振準位と出口障壁トップとの間のエネルギー差(約200meV)が小さいことによるもので、これが温度上昇に伴うスロープ効率の急激な低下と閾値電流密度の急激な増加として現われる。埋め込みヘテロ構造をもつデバイスは室温で12%の前面ファセット・ウォールプラグ効率(WPE)を有するが、このデバイスは温度に非常に敏感なため28%の理論WPE値の達成は不可能に近い。

キャリア漏れを抑制するために提案された多数の障壁と量子井戸構造の代替設計は不成功に終わったが、米ウィスコンシン大学マディソン校(UWM)と米海軍研究所(NRL)の研究チームはついに効果的な方法の開発に成功した<sup>(1), (2)</sup>。深いエネルギー量子井戸と高い障壁の利用、ならびに緩和と注入領域の慎重な設計によって、このレーザの活性領域からのキャリア漏れは大幅に抑制され、温度によるスロープ効率と閾値電流の変動率も従来のQCLに比して半分になった。言い換えれば、連続波(CW)動作における効率が大きい改善され、最終的に長期(1000時間以上)にわたる信頼できるワット出力レベルCW QCLが現実のものになった。

## 井戸を深くすること

この新しいデバイスにおける深い量子井戸は、歪み補償のために、活性領

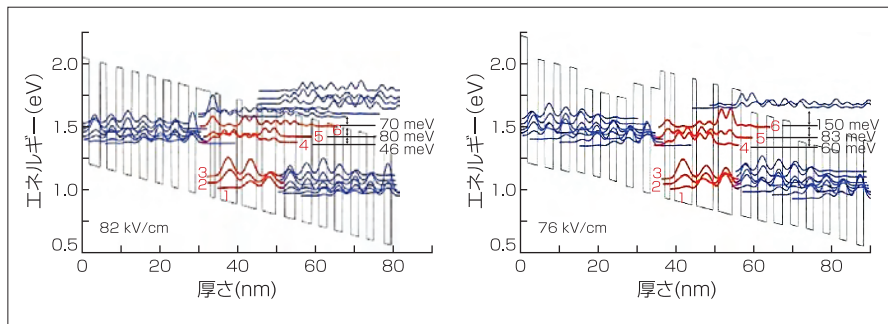


図1 従来式のQCL(左)に比して、新しい深い井戸QCLにおける量子井戸は、レーザ発振を制限するキャリア漏れを効率良く抑制する、上部レーザ発振準位(準位4)と活性領域の出口障壁トップとの間のエネルギー差によって約2倍の深さである(右)。

(資料提供:ウィスコンシン大学マディソン校)

域中のアルミニウム(Al)含有量を64%から75%へと大幅に増すことによって形成される高い障壁を必要とする。その結果、上部レーザ準位と出口障壁トップとのエネルギー差は450meVに拡大し、従来式QCLの2倍以上になる(図1)。また、従来のQCLとは異なり、活性領域の出口障壁直上の緩和領域はテーパー構造の伝導バンド端を持つことになる。これによって緩和領域の波動関数が活性領域から離れ、活性領域との重なりが最小になり、キャリア漏れがさらに抑制される。最終的に、研究チームは注入領域の伝導バンド端のテーパー化もキャリア漏れを低減することを発見した。

予測通り、深い井戸デバイスにおける閾値電流密度の特性温度は、20~90 $^{\circ}\text{C}$ の動作温度で従来のQCLの140Kに比べて約270Kまで高くなり、スロープ効率の特性温度は140Kから285Kへと上昇した。これらの高い特性温度値はキャリア漏れが極めて強く抑制されて

いることの現われである。UWM-NRLチームは、米マサチューセッツ工科大学ケンブリッジ校の科学者の協力を得て、従来型と深い井戸型QCLの特性温度を正確に推定できる理論モデルを開発した。キャリア漏れの抑制の結果として、4.8 $\mu\text{m}$ の深い井戸デバイスの前面ファセットCW WPE値は20%以上高い値になると推定された。

QCL WPEの改善に加えて、キャリア漏れの抑制は高出力レベルで優れた長期動作が得られることを意味している。UWM教授のダン・ボッテズ氏は、「ワット領域のCW出力において真に信頼できるQCL動作がこの深い井戸キャリア漏れ抑制によって可能になった。この新しいデバイスは、50%以上の室温CW WPE値の可能性を持つMIR量子ボックス[QB]レーザの実現に役立つはずだ」と語っている。このようなQBレーザは多くのMIRアプリケーション用ハンドヘルドセンサの中で冷却なしで動作することになるだろう<sup>(3)</sup>。(Gail Overton)

## 参考文献

- (1) D. Botez et al., Proc. SPIE 7616, 76160N, (February 2010); <http://dx.doi.org/10.1117/12.842593>.
- (2) J.C. Shin et al., Electron. Lett. 45, 741 (2009).
- (3) D. Botez et al., Future Trends in Microelectronics: Unmapped Roads, eds. S. Luryi, J. Xu, and A. Zaslavsky, Wiley Interscience-IEEE Press, in press(2010).