

## 自己組織化 InGaAs 量子ドットレーザー




小路 元

量子井戸構造の導入により半導体レーザーの性能は大幅に向上した。これは活性層を従来のバルク構造に比べてきわめて薄くすることで、電子と正孔を量子力学的に強く閉じ込めた結果による。この量子力学的な閉込め次元をさらに高め、膜厚方向のみならず、面内でも2方向から強く閉じ込めた三次元量子閉込め構造が量子ドットであり、これを活性層にもつレーザーが量子ドットレーザーである。量子ドットを活性層に用いた場合、状態密度の著しい低下に伴う光学利得の増大、活性層体積の減少の効果により、閾値電流の大幅な低減、温度特性の改善などさまざまな効果が理論的に期待される<sup>1)</sup>。このためその実現に向けた研究が内外で活発に行われてきた。しかし、理論的に期待される性能を実現するためには、10~20 nm の量子ドットを高密度かつ均一に作製する必要があり、当初試みられていたフォトリソグラフィとエッチングによる手法では至難の技であった。ところが近年、高歪みのエピタキシャル成長時に生じる自己組織化を利用すると、高密度・高均一な量子ドットを作製できることが明らかになり、量子ドットレーザーの実現に向けて大きなブレイクスルーを与えた。ここでは、量子ドットの半導体レーザーへの応用について、これまでに筆者らが検討した結果を中心に紹介する。

## 1. 自己組織化技術を用いた量子ドットの作製

自己組織化による量子ドットの作製については本特集において詳しい解説がなされるはずなので詳細は省略させていただくが、半導体レーザーへの応用という観点から検討されている方法には、表1のように主に3つのタイプの報告がある。1つは分子線エピタキシー(MBE)や有機金属気相成長(MOVPE)での特定の成長条件下で形成される成長島を利用した量子ドットである。Stranski-Krastanov(S-K)成長量子ドットともいわれ、作製例が最も多い。2つめは量子ディスクであり、

表1 代表的な量子ドットの作製法。

Type	成長法
成長島 (S-K growth)	MBE, MOVPE
	
ディスク	MOVPE
	
扁平球	ALEを応用した 交互供給法
	

MOVPEを用いてGaAs(311)B基板上にディスク形状の量子構造を規則的に配列させるものである。これは、横方向のサイズが30 nm以上とやや大きいものの、非常に均一性の高い量子構造が作製できる。3番目のタイプは筆者らが検討しているもので、原子層エピタキシー(ALE)技術を基礎にした交互供給法によって形成される。

## 2. 量子ドットレーザーへの応用

上述したように、量子ドットの作製方法にはいくつかのタイプがあるが、いずれの方法においても半導体レーザーへの応用が検討され、初期的な報告ながらもレーザー発振が達成されつつある。

## 2.1 島状成長量子ドット

ベルリン工科大学のKirstaedterらはS-K成長によって直径20 nm以下、厚さ2 nm程度の量子ドットを作製し、室温におけるレーザー発振を達成したと報告している<sup>2)</sup>。異なるサイズのドットを作製し、フォトルミネセンス(PL)ならびにエレクトロルミネセンス(EL)の観測から、930 nm近傍での発光を量子ドットからの発光と結論づけている。

## 2.2 量子ディスク

NTTの天明らはGaAs(311)B基板上でのInGaAs歪み量子ディスクの自己組織化を見だし、これを活性層とするレーザーの室温発振に成功している<sup>3)</sup>。レーザーには直径60~70 nm、厚さ6 nmの量子ディスクが用いられ、そのPL半値幅は12 meVときわめて均一性が高い。レーザーは940 nm近傍で発振し、GaAs(100)基板に同時に作製した量子井戸レーザーとの比較から、

Self-organized InGaAs quantum dot lasers (1996年3月26日受理)

Hajime SHOJI (株)富士通研究所 (〒243-01 厚木市森の里若宮 10-1)

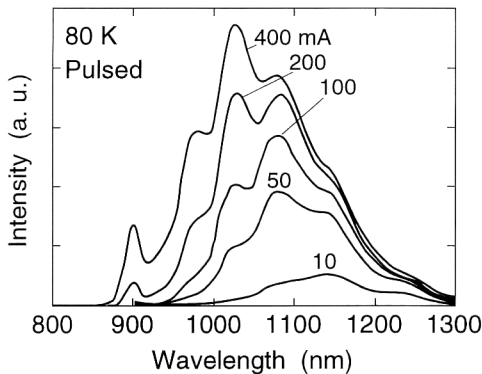


図1 ALE 交互供給法によって作製した量子ドットレーザーのエレクトロルミネッセンススペクトル。

量子ディスクからの発光であることが確認された。

### 2.3 ALE 交互供給法による量子ドット

一般に島状成長の量子ドットでは PL 半値幅も 80~100 meV と大きく、均一性が不十分なため、三次元量子閉込め効果を十分に見いだすには至っていない。また量子ディスクは良質の結晶が作製できる反面、その名のとおりに横方向のサイズが大きく、横方向の強い量子閉込め効果を期待できる領域には到達していない。また両者とも室温での PL 発光波長は 1  $\mu\text{m}$  以下の領域にある。

一方筆者らは、ALE を用いた独自の成長法により、室温において 1.3  $\mu\text{m}$  帯で発光する InGaAs 量子ドットを作製している<sup>4)</sup>。筆者らが作製した量子ドットは発光波長が長波長帯にあると同時に、直径 20 nm、高さ 10 nm と十分に小さくかつ PL の半値幅も 30~40 meV と狭い。図 1 にレーザーの 80 K パルス動作での閾値以下の EL スペクトルを示す。電流注入では初めて量子ドット固有の離散的なピークを明瞭に観測した<sup>5)</sup>。レーザーは閾値電流 1.1 A、波長 911 nm において、量子ドットの高次準位で発振し、図 2 に示した強磁場実験の結果からも確認されている。量子ドットでは磁場が印加されていない状態でも電子と正孔が強く閉じ込められているため、磁場による波長シフトは従来の量子井戸と比べて小さくなる。図 2 の結果はこの原理をはっきりと裏付けており、得られたレーザー発振が量子ドットからのものであることを示している。

### 3. 今後の課題

量子ドットレーザーは超低閾値レーザーとして期待されるものの、現状の報告例はその期待からはほど遠い。特性改善には、まず第一に量子ドットのサイズの微小化を図るとともに、サイズと組成の均一性の向上が不可欠

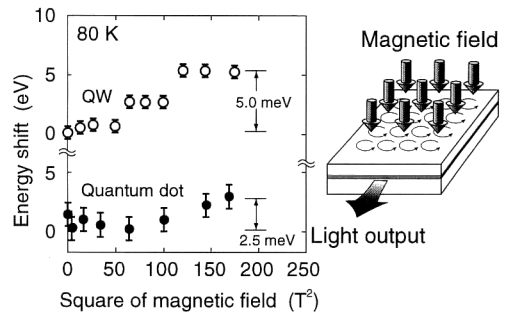


図2 強磁場中での発光ピークエネルギーシフト。

である。これらを達成しない限り、量子ドットの特性を十分に生かしたレーザーを作製することはできない。また、もうひとつの課題として、いわゆる「フォノンボトルネック」の問題を明らかにする必要がある。この問題については楽観的な見解と悲観的な見解の両者があるが、エネルギー準位が完全に離散的になる量子ドットではフォノンを介した準位間の緩和が生じにくくなる可能性があり、慎重な検討を必要とする。

量子ドットの半導体レーザーへの応用はまだ端緒にいたばかりであり、多くの課題を残している。しかし、自己組織化技術の登場は、実験的な検討の場をようやく与えることになり、将来の超高性能レーザーの実現に向けて大きな弾みとなることは疑いの余地がない。今後の研究の進展を大いに期待したい。

### 文 献

- 1) Y. Arakawa and H. Sakaki: "Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current," *Appl. Phys. Lett.*, **40** (1982) 939-941.
- 2) N. Kirstaedter, N. N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V. M. Ustinov, S. S. Ruvimov, M. V. Maximov, P. S. Kop'ev, Zh. I. Alferov, U. Richter, P. Werner, U. Gösele and J. Heydenreich: "Low threshold, large  $T_0$  injection laser emission from (InGa)As quantum dots," *Electron. Lett.*, **30** (1994) 1416-1417.
- 3) 例えば解説記事として、天明二郎、倉持栄一、須郷 満、西谷昭彦、R. Nötzel、玉村敏昭: "自己組織化 InGaAs ひずみ量子ディスクレーザー", *応用物理*, **65** (1996) 163-167.
- 4) K. Mukai, N. Ohtsuka, M. Sugawara and S. Yamazaki: "Self-formed  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  quantum dots on GaAs substrates emitting at 1.3  $\mu\text{m}$ ," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** (1994) L 1710-L 1712.
- 5) H. Shoji, K. Mukai, N. Ohtsuka, M. Sugawara, T. Uchida and H. Ishikawa: "Lasing at three-dimensionally quantum-confined sublevel of self-organized  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  quantum dots by current injection," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **7** (1995) 1385-1387.